

El agua subterránea en México: condición actual y retos para un manejo sostenible

R. Chávez, F. Lara y R. Sención

Comisión Nacional del Agua. Gerencia de Aguas Subterráneas
Insurgentes Sur # 2416, Piso 9. Col. Copilco, México, D.F. 04340, México
E-mails: ruben.chavez@cna.gob.mx - Fernando.lara@cna.gob.mx

RESUMEN

En México, el agua subterránea es un recurso vital para el desarrollo de todos los sectores ya que en más del 60% de su territorio prevalecen los climas seco y semiseco. A la fecha se han clasificado 650 acuíferos de donde se extraen 28.000 millones de metros cúbicos por año ($Mm^3/año$), de éstos el 70% se destina a la agricultura y el 27% al abastecimiento de las zonas urbano-industriales. Cerca de 100 acuíferos regionales están sometidos a un explotación intensiva lo que ha provocado un grave impacto ambiental en el curso de las últimas cuatro décadas y el minado de la reserva de agua subterránea. Para revertir este deterioro el enfoque actual para la gestión de las aguas subterráneas contempla una estrategia integral que incluye, entre otros aspectos: el manejo de la demanda en todos los sectores (conservación y uso eficiente), la reutilización del recurso, la participación más activa de los usuarios en la administración del agua, el diseño de estrategias para la estabilización de acuíferos, y la aplicación de la tecnología de la recarga artificial.

Palabras clave: acuíferos, agua subterránea, Consejo Nacional del Agua, manejo sostenible, México

Groundwater in Mexico: current status and challenges for its sustained development

ABSTRACT

Groundwater constitutes an essential resource for development in Mexico, since more than half of the country is dominated by arid and semiarid conditions. Presently, 650 aquifers have been both technically and administrative defined and they support a total groundwater abstraction of 28.000 cubic million per year (Mm^3/a). Agricultural activities use 70% of that volume, whereas urban and industrial areas consume 27%. Groundwater overdraft occurs in more than 100 regional aquifers and a yearly volume of 5.400 Mm^3 is taken from storage and resulting environmental consequences have been detected during the last four decades. A number of corrective actions have been implemented in order to overcome groundwater deterioration regarding both quantity and quality. Actions are grouped into an integral strategy including management of water demand for conservation and efficient use, water reuse, users' participation, and artificial recharge.

Key words: aquifers, Consejo Nacional del Agua, groundwater, México, sustained development

Introducción

En México, el agua subterránea es un recurso vital para el desarrollo de todos los sectores debido a que en más del 60% de su territorio prevalecen los climas seco y semiseco. Esta es la fuente que sostiene el riego de dos millones de hectáreas, la tercera parte de la superficie total bajo riego; suministra cerca del 70% del volumen de agua que requieren las ciudades para uso público-urbano, en donde se concentran 60 millones de habitantes; abastece a la mayoría de las instalaciones industriales, y casi la totalidad de la demanda de agua de la población rural.

En los últimos 40 años la reserva de cerca de 104 acuíferos fue minada y se sigue mermando al ritmo actual de unos 5.400 millones de metros cúbicos por año ($Mm^3/año$). Un grave impacto ecológico fue generado en las primeras décadas de uso intensivo (1960-80), provocando: desaparición de lagos y humedales, merma del caudal base de ríos, y pérdida de ecosistemas. Otros efectos fueron: disminución del rendimiento de los pozos, asentamiento y agrietamiento del terreno, contaminación del agua subterránea, intrusión salina, y fuerte competencia entre usuarios. Muchas de las ciudades más importantes se abastecen a costa de los acuíferos subyacentes; conforme

aumenta su demanda se ha incrementado la importación de agua de cuencas adyacentes para complementar su abastecimiento. Lo anterior reclama una administración más racional de la reserva de agua subterránea, que considere las limitaciones impuestas por su lenta renovación y otras restricciones físicas, económicas y ambientales, para prevenir su explotación destructiva. El presente texto describe un panorama general de condiciones actuales de los acuíferos en México, de la problemática de su aprovechamiento, y de las acciones para su manejo sostenible.

Marco físico, socioeconómico e institucional

México es una República Federal formada por 31 entidades federativas y un Gobierno del Distrito Federal (Cd. de México), y constituidos por 2.446 municipios. Sus principales características socioeconómicas y geográficas se resumen a continuación:

- Producto Interno Bruto (PIB): 6. 153 Miles de millones de pesos
- PIB per cápita: 59.374 Pesos
- Extensión territorial: 1.964.375 km²
- Extensión continental: 1.959.248 km²
- Litoral: 11.122 km
- Fronteras: 3.152 km con EUA; 956 con Guatemala y 193 con Belice.

Población y tasa de crecimiento

En 1950 México contaba con 25,7 millones de habitantes, para el 2000 con 97,4 millones, y en el 2005 con 107 millones. En los últimos 50 años la población casi se cuadruplicó y pasó de ser predominantemente rural (57%) a una de tipo urbana (75%). La tasa de crecimiento media anual disminuyó significativamente pasando de 3,0% en 1950, a 1,5% en el 2000. Para el 2030 se estima que será de sólo el 0,4% (CONAPO, 2003).

Marco institucional

De acuerdo con la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos las Aguas Nacionales (superficiales y subterráneas) pertenecen a la Nación, y es la Ley de Aguas Nacionales (LAN) el instrumento legal para regular la explotación, uso o aprovechamiento, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo sostenible. La autoridad y administración en materia de

aguas nacionales y de sus bienes públicos inherentes la ejerce el Ejecutivo Federal directamente o a través de la Comisión Nacional del Agua (CNA). La CNA es el órgano desconcentrado del Gobierno Federal que le corresponde ejercer la autoridad en materia hídrica y ser el órgano superior con carácter técnico normativo y consultivo de la Federación en materia de la gestión de los recursos hídricos, incluyendo la administración, la regulación, el control, y la protección del dominio público hídrico.

Regiones hidrológico-administrativas

El manejo del agua en México se realiza tomando como base 13 regiones hidrológico-administrativas. Las regiones se forman por la agrupación de regiones hidrológicas conservando municipios completos. Para el desempeño de sus funciones la CNA cuenta con una Gerencia Regional en cada una de dichas regiones. Ver Figura 1.

La programación de las líneas prioritarias del Gobierno Federal en materia hidráulica se realiza mediante Plan Nacional Hidráulico que se elabora cada seis años (CNA, 2001). Para el período 2000-2006 las líneas son las siguientes:

- a) Fomentar el uso eficiente del agua en la producción agrícola.
- b) Fomentar la ampliación de la cobertura y calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
- c) Promover el desarrollo técnico, administrativo y financiero del sector hidráulico.
- d) Consolidar la participación de los usuarios y la sociedad organizada en el manejo del agua y promover la cultura de su buen uso.



Fig. 1. Distribución de regiones hidrológicas en México
Fig. 1. Hydrological regions distribution in Mexico

- e) Disminuir los riesgos y atender los efectos de inundaciones y sequías.
- f) Lograr el manejo integrado y sostenible del agua en cuencas y acuíferos.

Para garantizar el aprovechamiento, preservación, en cantidad y calidad, y manejo adecuado y eficiente del agua se han publicado diversas Normas Oficiales Mexicanas (NOM). Entre las relativas al aprovechamiento de las aguas subterráneas destacan las siguientes:

- Construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos (CNA, 1996a); Protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general (CNA, 1996b); Conservación del recurso agua. Establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales (CNA, 2000).

Organismos de cuenca

Son instancias de coordinación y concertación entre la autoridad hidráulica, las dependencias y entidades de las instancias federal, estatal, municipal y los representantes de los usuarios de cada cuenca hidrológica. Su objetivo es formular y ejecutar programas y acciones para la mejor administración de las aguas, el desarrollo de la infraestructura hidráulica y de los servicios respectivos y la preservación de los recursos de la cuenca. Para su funcionamiento los Consejos de Cuenca pueden contar con organizaciones auxiliares a nivel de subcuenca, microcuenca o acuífero, de los cuales a la fecha se tienen instalados 25 de los 26 Consejos de Cuenca programados para cubrir la totalidad del territorio. En el 2000 se instaló el Consejo Consultivo del Agua que es un grupo de ciudadanos distinguidos que apoya en la labor de crear una nueva cultura del agua en la sociedad mexicana a través del Movimiento Ciudadano por el Agua.

Hidrogeología descriptiva

El territorio mexicano cuenta con diversidad de ambientes geológicos (ígneos, metamórficos, sedimentarios, y terrenos cársticos), y variedad de terrenos montañosos, cuyas características hidrogeológicas son fundamentales para el estudio de los acuíferos. Dentro de esta complejidad geológica se han clasificado 11 regiones hidrogeológicas, cuya división responde a la necesidad de agrupar regio-

nalmente áreas que se caracterizan por su fisiografía y homogeneidad geológico-estructural. Ver. Figura 2. Para la delimitación de estas provincias se tomó como base la división de la regiones hidrológicas, las provincias fisiográficas y geológicas, y los terrenos tectonoestratigráficos. En la Tabla 1 se presenta un resumen adaptado de las principales características de las provincias hidrogeológicas en México (Velásquez y Ordaz, 1989).

Infraestructura del conocimiento hidrogeológico

En diversas cuencas existen acuíferos regionales con extensión de cientos a miles de kilómetros cuadrados y espesor de varios cientos de metros. En sus primeras centenas de metros, los acuíferos están constituidos por clastos no consolidados de granulometría variada; mientras que a mayor profundidad están conformados por rocas consolidadas (ígneas o sedimentarias). A la fecha, se han realizado estudios hidrogeológicos de una superficie del orden de 1.200.000 km² (60% del territorio nacional), principalmente en las zonas que comprenden las porciones planas de las cuencas más importantes del país y las áreas montañosas adyacentes. La fracción complementaria (40%) corresponde a las grandes sierras, que por su topografía abrupta, y condiciones hidrogeológicas, en general no son propicias para la captación de agua subterránea, pero que revisten gran importancia por ser zonas receptoras de recarga y transmisoras del agua infiltrada a los acuíferos. La evaluación del recurso hidráulico subterráneo se lleva a cabo con un enfoque interdisciplinar, utilizando las bases teóricas y las metodologías reconocidas en el campo de la hidrogeología apoyada con las

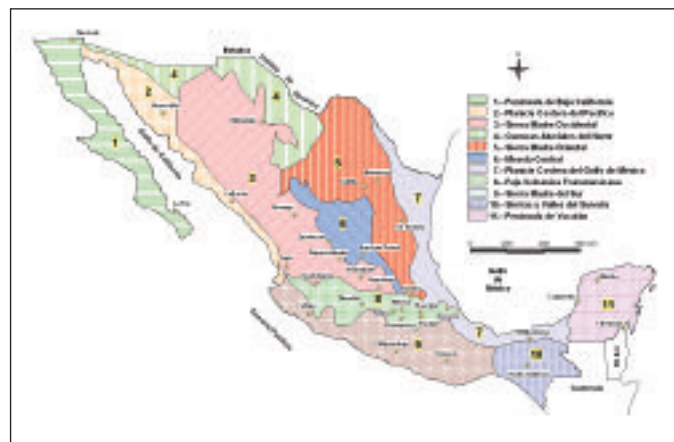


Fig. 2. Regiones hidrogeológicas en México
Fig. 2. Hydrogeological regions in Mexico

Región (N°)	Características Hidrogeológicas
Península de Baja California (1)	Esta formada por valles relativamente planos que tienen como base gruesos depósitos de aluvión separados por montañas alineadas, compuestas por rocas sedimentarias y metamórficas de edad Mesozoica y rocas volcánicas del Cenozoico. Por debajo de los cauces de los arroyos predominan rocas sedimentarias del Plioceno y Pleistoceno constituidas por areniscas y lutitas intercaladas conglomerados y estratos de arena y arcilla de baja permeabilidad. En las montañas se genera un flujo subterráneo a partir de un sistema de fracturas. Sus acuíferos, con excepción del de Mexicali, son casi inexistentes debido a las precipitaciones dispersas en pequeñas áreas de captación y a la baja permeabilidad de las rocas. Área = 143.492 Km ² .
Planicie costera del Pacífico (2)	Planicies costeras que en algunas áreas se internan al continente compuestas por sedimentos arenosos ; su base la forman rocas intrusivas y metamórficas del Mesozoico y volcánicas del Cenozoico. Este conjunto de rocas están bordeadas por sedimentos aluviales que junto a los derrames volcánicos del Cenozoico, constituyen los mejores acuíferos asociados a deltas cercanos a las costas. En las partes altas se presentan acuíferos en los abanicos aluviales formados de materiales gruesos provenientes de las montañas cercanas. Los espesores más potentes de la planicie costera se encuentran en sedimentos continentales y marinos intercalados por derrames basálticos. Área = 104.491 km ² .
Sierra Madre Occidental (3)	Una región disectada relativamente alta, compuesta por una compleja secuencia de rocas volcánicas del Cenozoico cubiertas por delgados depósitos de suelos residuales. La porción occidental está constituida por densos bloques de lava con grandes fallas cuyas rocas de baja permeabilidad constituyen un acuitardo. El volumen de agua captada en las cadenas montañosas se descarga local y regionalmente para escurrir a lo largo de las principales corrientes superficiales, e infiltrarse nuevamente y recargar los grandes acuíferos de las provincias adyacentes. Área = 358.845 km ² .
Cuencas Aluviales del Norte (4)	Valles relativamente planos que tienen como base gruesos depósitos aluviales separados por discontinuas cadenas de montañas compuestas de rocas sedimentarias paleozoicas y mesozoicas, y de rocas volcánicas del Cenozoico. Las montañas están constituidas de granito de edad pre-cámbrica, esquistos, filitas, pizarras y cuarcitas del pre-Cámbrico al Terciario Inferior; rocas sedimentarias carbonatadas, areniscas, limolitas y lutitas del Paleozoico al Mesozoico, y diversos tipos de rocas ígneas del Cretácico Superior. Los principales acuíferos están formados de sedimentos de cuenca del Cenozoico, contenidos dentro de los grabens y limitados por los bloques montañosos que actúan como límites hidrogeológicos. Área = 500 Km ² .
Sierra Madre Oriental (5)	Área relativamente alta de cadenas de montañas anticlinales y valles sinclinales compuestos por rocas sedimentarias del Mesozoico cubiertas por delgadas capas de suelos residuales. Las rocas carbonatadas del Cretácico Inferior y Medio son altamente solubles, mientras que las rocas del Cretácico Superior de permeabilidad baja. El flanco este de la Serranía del Burro esta cubierto por rellenos aluviales y conglomerados del Terciario y Cuaternario cuyos depósitos contienen importantes volúmenes de agua subterránea. Los afloramientos de la Formación Austin, constituidos por rocas calcáreas con pequeñas cantidades de pizarras, representan un acuífero somero de pequeño potencial. Área = 250.096 km ² .
Meseta Central (6)	Valles relativamente planos que tienen como base gruesos depósitos aluviales separados por suaves cadenas de montañas compuestas por rocas sedimentarias del Paleozoico y Mesozoico y por rocas volcánicas del Cenozoico. Entre las rocas permeables destacan los conglomerados, areniscas, rocas carbonatadas, rocas riolíticas y los sedimentos granulares que rellenan los extensos valles. De estos materiales, los sedimentos granulares constituyen los principales acuíferos. Las rocas en las cuencas aluviales incluyen metamórficas, ígneas, y sedimentarias del Paleozoico Superior al Reciente, incluyendo esquistos, calizas, areniscas y lutitas del Mesozoico e ígneas intrusivas y extrusivas del Mesozoico y Cenozoico, que actúan como barrera para al flujo subterráneo. Área = 102.519 Km ² .

Tabla 1. Características de la regiones hidrológicas de México
 Table 1. Characteristics of the hydrological regions in Mexico

Planicies Costeras del Golfo de México (7)	Planicies relativamente bajas poco disectadas que descansan sobre una interestratificación compleja de arenas, limos y arcillas del Mesozoico y Cenozoico que progresivamente se hacen más densos hacia la costa. Las rocas cenozoicas consisten en arena, limo y arcilla, que han generado diversos acuíferos regionales. La permeabilidad de las rocas cenozoicas es alta y su contenido de fluidos corresponde con agua salina o hidrocarburos. En algunas zonas costeras de Tamaulipas y en la porción norte y noreste de Nuevo León existe una anomalía de alta presión de fluidos desarrollada por sedimentos del Eoceno cercanos a la costa. Consiste en un horizonte de producción de hidrocarburos y aguas salinas asociadas con el retiro de los hidrocarburos. El agua presenta una temperatura mayor a los 100°C y concentraciones variables de metano. Área = 183.313 Km ² .
Faja Volcánica Transmexicana (8)	Consiste en un área de montañas compuesta por una secuencia compleja de rocas volcánicas del Cenozoico, con fosas profundas rellenas con material lacustre del Terciario y Cuaternario. Los derrames basálticos y la mayoría de rocas se caracterizan por una alta permeabilidad debido a su grado de fracturamiento. A profundidad las rocas consolidadas forman barreras para el flujo subterráneo. Los derrames de rocas no fracturadas intercaladas con relleno aluvial forman acuíferos locales independientes en rocas adyacentes. En las partes más bajas los acuíferos en derrames volcánicos fracturados están cubiertos por depósitos lacustres y aluviales por lo que forman acuíferos de tipo semi-confinado. En superficie se encuentran los depósitos lacustres muy porosos y de poca permeabilidad del Plioceno Tardío formando acuitardos. Área = 130.000 km ² .
Sierra Made del Sur (9)	Área montañosa altamente disectada, compuesta por rocas metamórficas y paleozoicas, rocas sedimentarias del Mesozoico y rocas volcánicas del Mesozoico y Cenozoico, cubiertas en las altiplanicies por suelos residuales y en las costas por material granular. Por sus rasgos geomorfológicos, ésta se divide en dos subregiones: Planicie Costera, franja paralela a la línea costera compuesta de aluvión y que forma acuíferos de baja producción. Las Sierras transversales alojan a las principales rocas permeables y el mayor volumen de agua subterránea. Las montañas están formadas por calizas y dolomías del Cretácico altamente carstificadas y las mesetas y valles altos compuestas de rocas sedimentarias continentales del Terciario, aluvión del Holoceno y gruesos depósitos de sedimentos piroclásticos del Cuaternario. Área = 258.274 Km ² .
Sierras y Valles del Sureste (10)	Área de cadenas de montañas, anticlinales y valles sinclinales compuestos por rocas sedimentarias del Mesozoico cubiertas por delgadas capas de suelos residuales. Se caracteriza por su alta precipitación sin embargo, debido a que ésta se infiltra en las partes bajas, la explotación de los acuíferos es la única opción para el desarrollo. En la planicie costera predominan las arenas, limos y arcillas, que constituyen el principal acuífero teniendo como basamento rocas metamórficas y graníticas. La sierra de Chiapas (un macizo granítico), presenta condiciones desfavorables para la formación de acuíferos. La Depresión central del estado de Chiapas es un <i>graben</i> compuesto por rocas sedimentarias de baja permeabilidad. Al sur, dentro de la Depresión, debido a que los rellenos son de poco espesor y el basamento es de granito, sus posibilidades acuíferas son prácticamente nulas. Área = 84.280 Km ² .
Península de Yucatán (11)	Consiste en una extensa planicie baja constituida por rocas carbonatadas consolidadas a semiconsolidadas del Cenozoico. Por su condición cárstica no existen corrientes ni cuerpos de agua superficial. Por sus características morfológicas, esta provincia se ha subdividido en regiones que son: Planicie Cárstica con Cenotes del Norte, formada por carbonatos marinos del Terciario con una gran disolución. El colapso de las rocas produce dolinas y sumideros conocidos localmente como "cenotes", palabra de origen maya. Los "cenotes" son de tipo circular, se ensanchan a profundidad y su diámetro puede alcanzar algunas decenas de metros. Planicie Cárstica Montañosa del Sur. Formada por carbonatos del Eoceno incluyendo calizas, calizas dolomíticas y dolomías. La presencia de rocas evaporíticas aflorando en la porción central, al sur de la península, propicia acuíferos con agua de mala calidad. Región de Bloques Afallados del Este. Se extiende desde Cabo Catoche, en la parte noroeste de la península hasta el sur, en el límite con la República de Belice. Las rocas carbonatadas se deben a una serie de fallas normales formando <i>horst</i> y <i>grabens</i> en cuyo interior, existen depresiones que forman lagos y regiones pantanosas. Área = 136.240 Km ² .

Tabla 1 (continuación). Características de las regiones hidrológicas de México
 Table 1 (continuation). Characteristics of the hydrological regions in Mexico

herramientas computacionales y de sistemas de información geográfica, y acorde a la disponibilidad de recursos financieros.

Consideraciones cuantitativas del recurso

El balance nacional de agua muestra que más del 70% del agua que llueve en el país se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el resto escurre por los ríos o arroyos o se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos de acuerdo con la siguiente distribución (CNA, 2004a).

- Valores anuales precipitación media histórica 1941-2002 (771 mm) 1.511 Mm³
- Evapotranspiración media 1.084 Mm³
- Escurrimiento natural medio superficial total 399 Mm³
- Recarga media total de acuíferos 77 Mm³
- Disponibilidad natural media total 476 Mm³
- Importaciones de otros países 49 Mm³
- Disponibilidad natural media por habitante 4.547 m³.

Las importaciones de otros países se refieren al volumen de agua que es generado en los países con los que México comparte cuencas (Estados Unidos de América, Guatemala y Belice) y que escurre hacia México.

Recursos renovables y reservas. Recarga natural de acuíferos

La mayor parte de la reserva aprovechable en los acuíferos está almacenada en los primeros cientos de metros en donde se presenta una renovación más dinámica, económicamente accesible y con agua de mejor calidad. A profundidades mayores la reserva de agua en acuíferos regionales puede ser cuantiosa; pero su disponibilidad es incierta debido a que en gran parte no es renovable, la permeabilidad y la porosidad decrecen por compactación y su salinidad total o contenido de elementos químicos es elevada.

A escala nacional, la recarga de los acuíferos es superior a 70.000 Mm³/año. No obstante, este balance global no refleja la crítica situación de vastas regiones áridas, donde el balance hídrico es negativo y se está agotando el almacenamiento subterráneo. Mientras que, en contraste, en las cuencas más lluviosas, de menor desarrollo y densidad de población, escapan importantes cantidades de agua del subsuelo sin aprovechamiento. Se estima que en los últimos 40 años, la reserva nacional de agua subterránea fue minada por sobreexplotación en unos 60.000

Mm³/año; y que hasta una profundidad de referencia de 400 m hay cantidades importantes de agua almacenada. Aunque la reserva subterránea es cuantiosa es un recurso en gran parte no renovable y cuyo aprovechamiento presenta limitaciones por lo cual no se le debe considerar como un recurso inagotable.

Recursos subterráneos

Para fines de administración del agua, el país se ha dividido en 650 acuíferos, de los cuales en 104 de éstos la extracción es mayor a su recarga. Desde 1975 este número ha aumentado sustancialmente: 32 en 1975, 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2001, y 102 en el 2003.

Redes de monitoreo piezométrico

La medición sistemática de los niveles piezométricos es una tarea fundamental para el conocimiento y administración de los acuíferos. Ésta se inicia en la década de los 50, posteriormente, a partir de los años 90, se inició un Programa de Reactivación de Redes de Monitoreo Piezométrico (PRRMP) el cual incluyó en su primer etapa la reactivación de las redes en 170 acuíferos, de un total de 650. El PRRMP ha permitido: determinar la condición actual de la elevación del nivel estático, predecir su evolución en respuesta a fenómenos naturales o actividades antropogénicas, analizar un gran volumen de información histórica para el cálculo de la recarga y la disponibilidad media anual, evaluar los impactos del bombeo, aplicar modelos numéricos de flujo, programas de uso sostenible, y protección del acuífero, entre otros.

Las mediciones se realizan en piezómetros, pozos abandonados o de producción. La frecuencia de medición se determina con base en el tipo de acuífero, condición de explotación, y velocidad de recarga, y en la mayoría de los casos el período de medición varía entre uno y dos años. La información de las redes se administra a través de un Sistema de Información Geográfica y su procesamiento se realiza por acuífero, por estado, y actualmente de manera regional para cada una de las 13 cuencas hidrológicas del país. A la fecha se han reactivado 170 redes que incluyen 6.000 pozos de monitoreo con una densidad de medición de 4 pozos/100 km² en zonas heterogéneas, a 2 pozos/100 km², en áreas homogéneas de gran extensión (Ver Figura 3). A partir de 2004 inició un programa de la instalación de dispositivos automáticos de medición de niveles piezométricos y finales del 2006 se contará con un total de 100 sondas

automáticas instaladas en diversos acuíferos que presentan alguna de las siguientes características: i) cuando se ubiquen en grandes áreas de extensión ii); manifiesten una rápida respuesta a lluvias ciclónicas o sequías; iii) con altos ritmos abatimiento >3.0 m/año, en distritos de riego, o de interés ecológico; y en iv) acuíferos transfronterizos (México-EUA).

Recursos no convencionales. Recarga artificial de acuíferos

Debido a la escasez de las aguas superficiales, las aguas residuales de las zonas urbanas-industriales constituyen un cuantioso recurso potencial para recarga, por su permanencia y magnitud creciente. El agua meteórica o superficial, que no han transitado por focos de contaminación, pueden ser aplicadas a la recarga artificial sin restricciones en cuanto a su calidad. Por el contrario, la aplicación de aguas residuales para fines de recarga artificial puede provocar el deterioro de la calidad del agua subterránea y daños a la salud pública, especialmente cuando existe el riesgo de que ésta migre a las captaciones de agua potable.

Por lo anterior se emitió una norma que regula el uso de las aguas residuales en la recarga artificial de acuíferos (CNA, 2004c). Esta norma se formuló con un criterio de que no ser tan estricta que resulte inviable o desaliente la aplicación de esa tecnología ni tan laxa que comprometa la salud pública, y considera al subsuelo como una planta de tratamiento natural que puede ser aprovechada con una combinación adecuada de pretratamiento-tratamiento natural-postratamiento, compatible con el método de recarga y con

el uso que se le pretenda dar al agua recuperada. A nivel de agua superficial destacan algunos proyectos piloto de recarga en la Región Lagunera, en donde se aplicó el método de recarga desde la superficie, utilizando estanques de infiltración habilitados en el cauce del río Nazas y agua superficial derivada de un canal del distrito de riego. El experimento demostró que es viable aplicar la recarga artificial para preservar a la porción del Acuífero Principal que suministra agua para uso público urbano y doméstico (Lara, 2003).

Captación de agua subterránea en las fajas costeras

En diversos acuíferos costeros es factible la captación parcial de la descarga natural de agua dulce al mar, en cantidades suficientes para atender demandas de desarrollos turísticos o urbano-industriales de menor tamaño, sin provocar la intrusión salina, a condición de que las captaciones sean diseñadas, construidas, equipadas y operadas conforme a especificaciones muy rigurosas.

Aprovechamiento de agua subterránea salobre para su desalinización

Se ha evaluado la factibilidad de captar agua subterránea salobre para su desalinización. Esta acción tiene la ventaja de aprovechar una fuente prácticamente inagotable de calidad estable y sin problemas de uso competitivo pero a un costo de tratamiento que puede resultar prohibitivo. En acuíferos costeros de gran tamaño, puede ser factible la captación de agua salobre con la consiguiente reducción del costo de su tratamiento. Esta opción se analizó como parte de un proyecto para complementar el abasto de agua a la ciudad de Hermosillo, Son., concluyendo que es viable durante varios años, aunque eventualmente sea necesario llegar al tratamiento de agua marina.

Explotación de acuíferos profundos

En zonas montañosas y desérticas, es factibilidad aprovechar acuíferos profundos que podrían suministrar volúmenes significativos de agua económicamente accesible en cantidad suficiente y de calidad aceptable, al menos temporalmente. Los extensos bolsones de la región norte en algunos de los cuales existen considerables reservas de agua que, aunque prácticamente no renovable y de regular calidad, se puede aprovechar durante largo tiempo con algún tipo de tratamiento y desalinización a bajo costo.



Fig. 3. Distribución de las redes piezométricas y densidad de monitoreo
Fig. 3. Piezometric network distribution and monitoring density

Presas subterráneas

Actualmente, se desarrolla un proyecto piloto para la construcción de una presa subterránea en el acuífero costero La Misión, Baja California, en colaboración con *Japan Green Resources Agency* (JGreen, 2004; García y Gómez, 2004). Esta contribuiría a controlar la intrusión salina e incrementar la disponibilidad de agua subterránea, principalmente para abastecimiento de agua a localidades cercanas, incluyendo la Cd. de Ensenada. Los resultados muestran que es viable la construcción de una presa subterránea en su sitio ubicado a unos 3,5 km del litoral, con una longitud de 500 m, una altura máxima de 60 m y una sección de 21.000 m². Se estima que la construcción de presas subterráneas podría aplicarse en diversos acuíferos costeros en donde el desarrollo dependa casi en su totalidad del agua subterránea y no existan alternativas más económicas para satisfacer la demanda de agua, como en el caso de la Península de Baja California.

Calidad de las aguas subterráneas

La Figura 4 muestra la salinidad total del agua subterránea, expresada en términos del contenido de sólidos disueltos totales (STD). La mayor parte de los 650 acuíferos clasificados a nivel nacional, contienen agua con salinidad menor que 1.000 mg/L de STD, que es el límite máximo permisible en el agua destinada al consumo humano en México. La presencia de agua salobre o salada es común en las zonas áridas debido a la escasa precipitación pluvial y a la elevada evaporación así como en algunas cuencas costeras y en acuíferos de gran tamaño, en este caso debido al tiempo de tránsito del agua en el subsuelo que suele alcanzar cientos o miles de años. En las cuencas de las regiones áridas es común que se utilice agua con salinidad superior a los 1.000 mg/l para el consumo humano y de hasta 10.000 mg/l para el uso pecuario, debido a la escasez del recurso.

Agua dulce (STD < 1.000 mg/L)

Corresponde al agua presente en la mayor parte de los acuíferos y que tiene su origen en las infiltraciones de las precipitaciones que se generan sobre los valles y en las estribaciones de las elevaciones topográficas. Los principales acuíferos están constituidos por arenas y gravas, rocas carbonatadas y basaltos, cuyos minerales son disueltos por el agua durante un tiempo de residencia relativamente corto. Predo-

minan las concentraciones entre 400 y 700 mg/l por lo que este tipo de agua constituye una fuente ideal para satisfacer todos los usos.

Agua ligeramente salobre (STD entre 1.000 y 2.000 mg/l)

En los acuíferos de los estados de Coahuila y Tamaulipas es característica la presencia de agua entre 1.000 y 2.000 mg/l de STD debido a la presencia de yesos y anhídritas entre las rocas que constituyen los acuíferos. En estado de Campeche se caracteriza por la presencia de yesos y anhídritas lo que genera una salinidad media a alta. En las zonas costeras debido al uso intensivo de las aguas subterráneas se ha provocado el fenómeno de intrusión salina.

Agua salobre (2.000 mg/l < STD < 10.000 mg/l)

Existen diversos acuíferos con contenidos de sales superiores a los 2.000 mg/l. En la Península de Baja California y la zona costera de Sonora y Sinaloa, los acuíferos tienen continuidad con el mar, por lo que su explotación generalmente provoca intrusión salina. Mientras que en los estados del noreste del país corresponden a zonas áridas con lagunas intermitentes donde se depositan sales evaporíticas. Estas sales forman parte de las elevaciones topográficas y son disueltas y transportadas por el agua de lluvia que se precipita e infiltra. Hacia el área fronteriza del Río

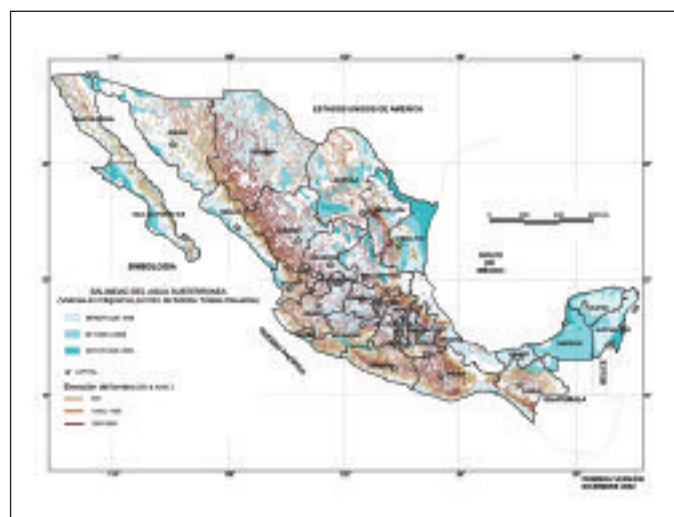


Fig. 4. Calidad del agua subterránea en México en términos de sólidos totales disueltos
Fig. 4. Groundwater quality in Mexico in terms of dissolved total solids

Bravo, Tamaulipas, los materiales que constituyen el subsuelo incluyen sales evaporíticas las cuales son disueltas por el agua subterránea. En el área costera de Campeche y Q. Roo, la suave topografía del terreno, de algunas decenas de centímetros, genera áreas anegadas con agua salina. Las variaciones en la elevación de las mareas y la precipitación de lluvias ciclónicas son factores que controlan las fluctuaciones en la calidad del agua.

Presencia de metales pesados

Varias cuencas del norte y centro del país afrontan problemas de salud pública derivados de la presencia natural de elementos químicos en el agua subterránea como arsénico, flúor, hierro, y manganeso, en concentraciones superiores a la norma de calidad para agua de consumo humano. Desde hace varias décadas se ha documentado la presencia de flúor y arsénico en acuíferos de los estados de Durango, Zacatecas, Chihuahua, San Luis Potosí, Guanajuato, y Coahuila, entre otros. En éstos se han realizado estudios para determinar su origen, conocer su distribución, localizar fuentes alternativas o proponer acciones para mejorar la calidad del agua. Para atender esta problemática se tienen en proceso las acciones siguientes:

- a) Monitorear la calidad del agua subterránea en zonas críticas para ampliar el conocimiento de su distribución espacial y origen.
- b) Aplicar medidas de control para reducir la concentración de As y otros metales en el agua para consumo humano a través de: Sustitución de las fuentes de abastecimiento, dilución de concentraciones mediante la combinación de diferentes fuentes, tratamiento convencional para reducir la concentración de As y reducción gradual del límite de As permisible establecido en las normas de calidad, en la medida que lo permitan las condiciones socio-económicas del país.

Contaminación de origen antropogénico

Otro de los problemas relevantes es el provocado por derrames o fugas de hidrocarburos, principalmente gasolinas y diesel. En este caso se han documentado más de 50 sitios en estados con gran actividad ligada a la extracción, conducción y distribución de hidrocarburos. Aun cuando su impacto es de tipo local y temporal, su ocurrencia en los acuíferos que abastecen a las grandes ciudades es un riesgo constante. Entre las fuentes más comunes que originan un derrame destacan: prácticas inadecuadas de manejo

de crudo y sus productos, tomas clandestinas en oleoductos, derrames provocados por accidentes carreteros o ferroviarios, corrosión de tanques de almacenamiento o ruptura de oleoductos subterráneos, entre otros.

Intrusión salina

Como consecuencia de la explotación intensiva del agua subterránea en zonas costeras, se han identificado 18 acuíferos invadidos por el agua marina. Los casos más críticos se ubican en la Península de Baja California y en el estado de Sonora. En esos acuíferos el agua salina ha migrado tierra adentro, inutilizando gran cantidad de pozos y una superficie importante de terrenos de cultivo, e incrementando en la salinidad del agua subterránea hasta alcanzar concentraciones no aptas para los usos más comunes.

Recuperación de acuíferos contaminados

Dada la dificultad técnica y el alto costo del saneamiento de los acuíferos actualmente se aplica un enfoque preventivo además de atender los casos de contaminación ya generados. Se lleva a cabo el monitoreo sistemático de la calidad del agua y se han logrado avances en el establecimiento de bases técnicas para: i) orientar el diseño y la operación de las redes de monitoreo de la calidad del agua subterránea, ii) determinar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, iii) analizar la migración de los contaminantes en el subsuelo y iv) definir los métodos para el saneamiento de los acuíferos. Para contribuir a reducir el deterioro de la calidad del agua subterránea la nueva Ley de Aguas Nacionales (CNA, 2004b) ha incorporado la figura de "Reparación del Daño Ambiental", la cual obliga a los particulares a reparar en términos económicos, los daños causados a los cuerpos de aguas nacionales en los casos en que éstos presenten una contaminación de tipo irreversible. Las personas físicas o morales que causen la contaminación de un cuerpo receptor asumirán la responsabilidad de reparar el daño causado, mediante la remoción de los contaminantes y restituirlo al estado que guardaba antes de producirse el daño, o cuando no fuere posible, mediante el pago de una indemnización fijada en términos de Ley.

Usos del agua

Existen alrededor de 327.650 títulos de aguas nacionales y bienes públicos inherentes registrados ante el

REPDA, los cuales se distribuyen de la siguiente manera: 57% uso agropecuario, 41% abastecimiento público, 2.5%; Industria autoabastecida, 0,03% hidroeléctricas. En el caso particular del agua subterránea el subsuelo suministra un volumen de agua del orden de 27.890 Mm³/año: de los cuales 6.498 Mm³/año son para uso público-urbano, en beneficio de cerca de 75 millones de personas; 1.283 Mm³/año para uso industrial: más del 90% del volumen de agua utilizado en los desarrollos industriales procede del subsuelo; 586 Mm³/año para uso agrícola, destinados al riego de unos dos millones de hectáreas; 19.523 Mm³/año para usos doméstico y de abrevadero, casi la totalidad del agua que requiere la población rural.

Disponibilidad de agua subterránea

Este es uno de los elementos técnicos más importantes para la administración del recurso, ya que en ésta se basa el otorgamiento de nuevas concesiones, la programación hidráulica, los planes de manejo, el establecimiento de nuevos desarrollos, y la declaración de vedas, reglamentos y reservas de agua. La disponibilidad media anual de agua subterránea se define como: "el volumen medio anual de agua que puede ser extraído de una unidad hidrogeológica para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas" (CNA, 2000).

Para determinar la disponibilidad del agua subterránea se regularizaron los usuarios para complementar el Registro Público de los Derechos de Agua (REPDA), se definieron formalmente las unidades de gestión, se formuló la Norma Oficial Mexicana que establece los métodos para determinar la disponibilidad de agua, y se actualizaron los estudios para cuantificar los volúmenes renovables de agua de las principales fuentes subterráneas.

La caracterización de los acuíferos fue una tarea compleja por tratarse de sistemas inaccesibles, de geometría irregular, litología heterogénea y grandes dimensiones. Por ello, sus fronteras laterales y verticales solo se pueden definir en forma simplificada porque las rocas rigurosamente impermeables no son comunes. En muchos casos, no se trata de fronteras físicas propiamente dichas, sino de límites convencionales que en las partes altas coinciden con las divisorias de aguas, y en las bajas con límites políticos (municipales, estatales) o con elementos hidrológicos (ríos), por facilidad administrativa. Por su parte, la norma de disponibilidad de agua subterránea, establece los métodos y especificaciones para

determinar su valor e incluye los métodos aplicables con la información disponible. Los métodos se basan en la aplicación de balances de agua a los acuíferos o a porciones de éstos. Finalmente la disponibilidad de agua se determina restando a los volúmenes medios anuales renovables, las cantidades de agua ya concesionadas y las comprometidas con el medio ambiente. Ver Figura 5.

En el 2002 se publicó oficialmente la disponibilidad de agua subterránea de 212 de los acuíferos más importantes y estudiados del país, entre los cuales se cuentan los claramente sobreexplotados y los que tienen una gran disponibilidad de agua (DOF, 2003). Este grupo de acuíferos representa la tercera parte del total pero su importancia es clara ya que de ellos cerca del 87% del volumen de agua subterránea se extrae del subsuelo. De los 212 acuíferos, 108 tienen una disponibilidad de 18.207 Mm³/año; mientras que los 104 restantes tienen un déficit de 4.694 Mm³/año.

Problemática de la explotación de acuíferos

De 650 acuíferos definidos convencionalmente 104 están sometidos a una explotación intensiva. Los casos más críticos se presentan en la cuenca del río Lerma -principalmente en su porción correspondiente a los estados de Guanajuato y Querétaro-, en la Región Lagunera (Coah.-Dgo.) y en los estados de Aguascalientes, Chihuahua y Sonora. Aunque, en número, los acuíferos en esta condición representan menos del 20% del total, la dimensión del problema se pone de manifiesto, si se considera que esos acuíferos suministran cerca del 80% del volumen total de agua extraído del subsuelo. Una fracción significativa de la reserva estratégica de agua subterránea se ha

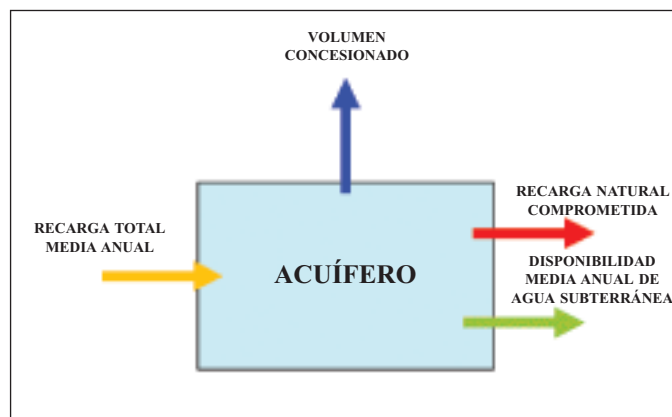


Fig. 5. Método para determinar la disponibilidad de agua subterránea
 Fig. 5. Methodology to calculate groundwater availability

minado gradualmente. Varios de los acuíferos sobreexplotados, han perdido entre el 20% y el 25% de su reserva original. Otros efectos derivados del abatimiento son: inutilización o disminución del rendimiento de los pozos; incremento de los costos de extracción del agua, asociados con pozos de mayor profundidad, consumos crecientes de energía eléctrica; contaminación de acuíferos e intrusión salina en acuíferos costeros; fuerte competencia por el uso entre sectores.

En las zonas de acuíferos sobreexplotados, tal situación compromete el desarrollo sostenible de todos los sectores, con serias repercusiones sobre la economía nacional. Por otra parte, a futuro se espera un importante incremento de la demanda de agua, principalmente para usos público-urbano e industrial, y a causa de los cambios climáticos globales, cabe la posibilidad de que ocurran sequías más severas, prolongadas y frecuentes.

Por otra parte, la demanda de agua de las ciudades es cada vez más difícil de atender ya que, en muchos casos, su abasto depende de la liberación de agua ya concesionada para otros usos mediante transferencia de derechos, uso eficiente del agua e intercambio de agua residual tratada. Este problema se agrava por la tendencia acelerada del crecimiento demográfico. En general, el abasto de agua a las poblaciones menores y comunidades rurales es deficiente en cantidad, porque la mayoría de los acuíferos someros se han agotado y las captaciones someras son muy vulnerables a la extracción de los usuarios mayores.

La calidad del agua subterránea también se está convirtiendo en un factor cada vez más limitante en un número creciente de cuencas. Dependiendo de las prácticas agrícolas y de las características del subsuelo, los acuíferos que subyacen a las zonas agrícolas están degradados en diferente medida por el lavado de los suelos y por el uso inadecuado de agroquímicos. Los acuíferos que se extienden bajo las zonas urbano-industriales tienen impacto por la infiltración de aguas residuales o por lixiviación de residuos sólidos.

El conocimiento que se tiene de los acuíferos más importantes es aceptable para los fines generales de la administración del agua; pero aún es insuficiente para orientar el manejo más flexible y complicado, que se requiere para conciliar la preservación de los acuíferos con la satisfacción de las crecientes demandas de agua. Asimismo, los ordenamientos legales en materia de agua son insuficientes o inadecuados para la gestión eficaz del agua subterránea: en su mayoría las vedas son inoperantes e incompatibles con las actuales condiciones de explotación de los acuíferos.

Conclusiones

Del anterior diagnóstico se desprende la urgencia de preservar el agua subterránea, en cantidad y calidad, como un recurso patrimonial, que debe ser manejado y administrado para asegurar el desarrollo aun en las condiciones climáticas más adversas.

Tradicionalmente, la creciente demanda de agua fue satisfecha mediante el incremento de la oferta a través de la construcción de nuevas obras de captación. Dicha práctica se aplicaba aun cuando una fracción considerable del volumen servido se perdía en las conducciones o se utilizaba con poca eficiencia. Conforme la oferta de agua fue insuficiente el enfoque ha ido cambiando hacia una estrategia integral brindando especial atención al manejo de la demanda en todos los sectores. En el sector urbano se han implantado programas para la detección y reducción de fugas, se ha mejorado la macro y micromedición, se ha promovido el uso eficiente del agua, se aplican sanciones por faltas a los ordenamientos legales y en menor medida se han ajustado las tarifas. En el sector industrial, se ha promovido la reutilización de agua residual tratada en actividades que no requieren agua potable, ofreciendo estímulos fiscales a los usuarios que cambian el agua de primer uso por la residual. En el sector agrícola, se están emprendiendo proyectos para la modernización del riego, que incluyen: el cambio de cultivos tradicionales por otros más productivos y menos consumidores de agua, la rehabilitación de la infraestructura agrícola y la capacitación de los usuarios en la aplicación de tecnologías como la plasticultura. Por considerar que el usuario es el personaje más importante en la gestión del agua, la LAN promueve su participación en consejos y comités, que colaboran con la Autoridad Hidráulica en la formulación y ejecución de planes orientados a distribuir, desarrollar y preservar los recursos hidráulicos.

Donde la disponibilidad de agua es insuficiente para satisfacer las demandas de las ciudades, se promueve la liberación de derechos, sobre volúmenes de agua subterránea para cambiarlos de otros usos al público-urbano. Esta acción se lleva a cabo por medio de la transferencia de derechos de los concesionarios agrícolas desplazados por la expansión de las manchas urbanas, a los usuarios industriales o a los organismos operadores de los sistemas urbanos; el intercambio por agua residual tratada para usos que no requieren agua potable, o la aplicación de programas orientados a mejorar la eficiencia en el uso agrícola.

La compleja problemática exige una gestión eficaz del agua subterránea, que incluya acciones para propiciar su preservación, aprovechamiento integral, uso

eficiente y reutilización, así como criterios flexibles de manejo que tomen en cuenta el carácter dinámico de la renovación de las fuentes y las variaciones de la calidad, impuestas por causas naturales y artificiales. El conocimiento actual del agua subterránea tiene que ser ampliado para hacer frente al crecimiento acelerado de las demandas del recurso. Entre las acciones siguientes de este proceso se cuentan:

- Modernización del monitoreo del agua en todas las fases del ciclo hidrológico.
- Publicación de la disponibilidad de acuíferos, y actualización de los datos publicados. Incorporación de los aspectos de calidad del agua en la determinación de la disponibilidad
- Adecuación, derogación, formulación y concertación de ordenamientos de cuencas y acuíferos: vedas, reglamentos y reservas.
- Diseño de estrategias para un desarrollo sostenible, mediante la implementación de planes de manejo que incluyen: manejo de la demanda, cambios de uso, modernización del riego, reutilización del agua y, en su caso, reducción de los volúmenes de agua concesionados.
- Apoyo a la formación y operación de Consejos de Cuenca y Comités Técnicos de Aguas Subterráneas. Capacitación de usuarios en lo relativo al uso eficiente del agua en todos los sectores.

Referencias

- CNA 1996a. *Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos*. Norma Oficial Mexicana. NOM-003-CNA-1996.
- CNA 1996b. *Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general*. Norma Oficial Mexicana. NOM-004-CNA-1996.
- CNA 2000. *Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. Norma Oficial Mexicana. NOM-011-CNA-2000.
- CNA 2001. *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*. Comisión Nacional del Agua. México. 128 pp.
- CNA 2004a. *Estadísticas del Agua en México*. Comisión Nacional del Agua. México. Edición 2004. 140 pp.
- CNA 2004b. *Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento*. Comisión Nacional del Agua. México. Edición 2004. 206 pp.
- CNA 2004c. *Requisitos para la recarga artificial de acuíferos*. Norma Oficial Mexicana NOM-014-CNA-2003.
- CONAPO 2003. *Proyecciones de Población 2000-2030*. Consejo Nacional de Población. Mexico. CD-Rom.
- DOF 2003. SEMARNAT. *Acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, los resultados de los estudios realizados para determinar su disponibilidad media anual de agua y sus planos de localización*. Diario Oficial de la Federación. México. 106 pp.
- García, R. y Gómez, A. 2004. *Presa Subterránea La Misión, Municipio de Ensenada, B.C. Estudios Básicos y Anteproyecto*. Comunicación Interna CNA. México.
- JGreen. 2004. *Technical Reference for Effective Groundwater Development*. Japan Green Resources Agency. Japan.
- Lara, F. 2003. *Feasibility Study for Artificial Aquifer Recharge at The Comarca Lagunera, Coahuila, Mexico*. En: *Proc. 11th Biennial Symposium Groundwater Recharge*. Arizona Hydrological Society. AZ. USA.
- Velázquez, L. y Ordaz, A. 1989. *Provincias Hidrogeológicas de México. Ingeniería Hidráulica en México*. Abril 1992. 22pp.

Recibido: septiembre 2005.
Aceptado: enero 2006.