

El Agua en México: Retos y Oportunidades

Luis Ernesto Marín Stillman

Investigador Titular “C”, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, México, D.F., México CP 04510 email: lmarin@geofisica.igeofcu.unam.mx

Resumen

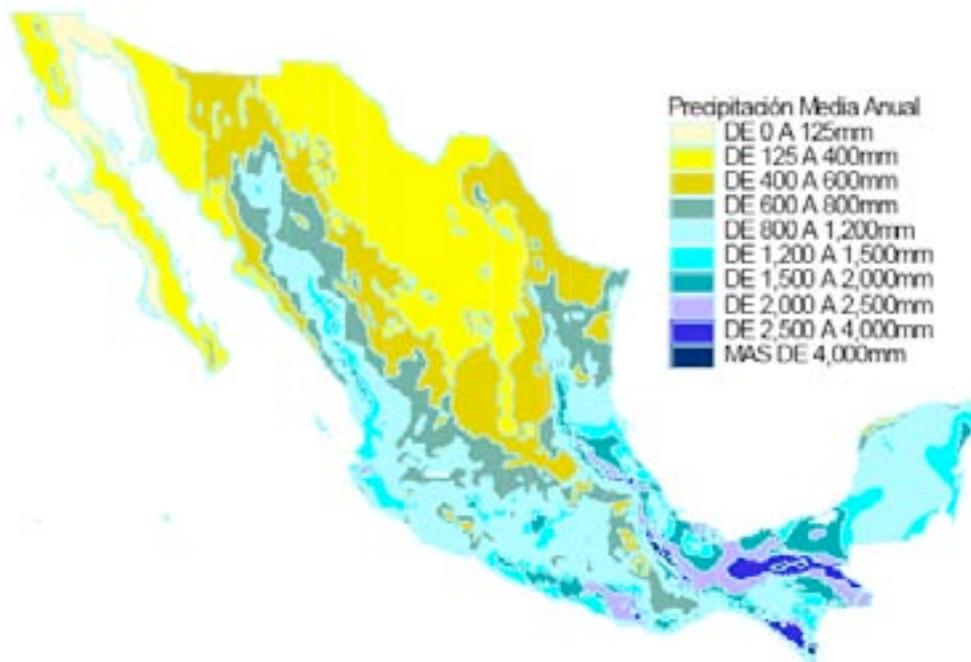
México tiene una superficie de aproximadamente 2,000,000 km², y una población del orden de 100,000 de habitantes. La ubicación de la población y de los principales polos de desarrollo industrial están inversamente relacionados con la disponibilidad del agua. El clima en la parte norte de México es árida a semi-árida, y es en esta zona donde se encuentran las ciudades más grandes del país, así como las principales concentraciones de actividad industrial y agrícola. Sin embargo, esta región apenas cuenta con menos de la tercera parte de los recursos hidráulicos del país. Por lo tanto, el agua subterránea juega un papel esencial en la economía de México, ya que para dos terceras partes de México, el agua subterránea es la principal fuente, y en ocasiones la única fuente, de agua.

Parte I: Retos

I. Situación actual del agua en México

México tiene casi 2,000,000 de km² de superficie y una precipitación media anual de 772 mm. Sin embargo, su distribución espacial y temporal es irregular ya que en 42% del territorio, principalmente en el norte, la precipitación media anual es menor a 500mm, y en algunos casos como en las zonas próximas al río Colorado, son menores a 50 mm. En contraste, en 7% del territorio, existen zonas con precipitaciones medias anuales superiores a los 2,000 mm, con zonas donde la precipitación es mayor a 5000 mm (Fig. 1). Del 67%-80% de la precipitación ocurre en el verano (Arreguim y otros, 2004; Cantú y Garduño, 2004).

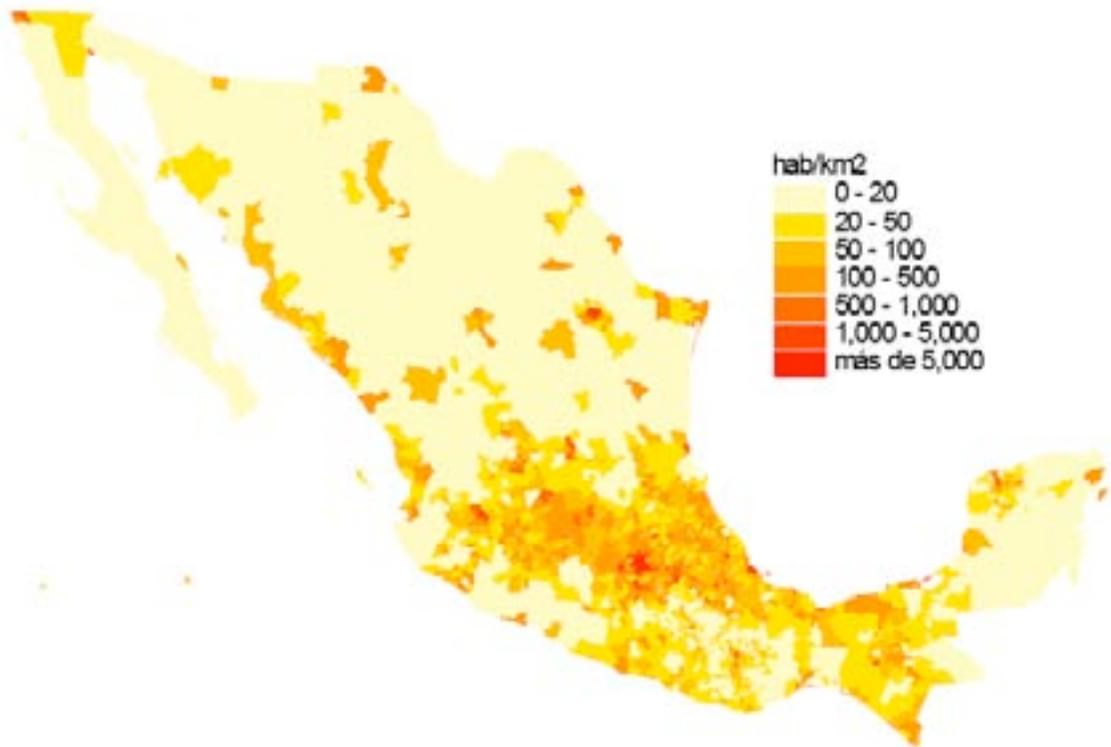
Figura 1. Precipitación media anual en México



México cuenta con un escurrimiento superficial virgen medio de 394 km³. De la precipitación anual, el 23% se vuelve escurrimiento superficial; este se suma a 40 km³ provenientes de Guatemala, 1.8 km³ del río Colorado y restándole 0.44 km³ que en promedio se entregan a los Estados Unidos en el río Bravo (Arreguim y otros, 2004).

El clima en la parte norte de México es árida a semi-árida, y es en esta zona donde se encuentran las ciudades más grandes del país, así como las principales concentraciones de actividad industrial y agrícola. Sin embargo, esta región apenas cuenta con menos de la tercera parte de los recursos hídricos del país (Fig. 2).

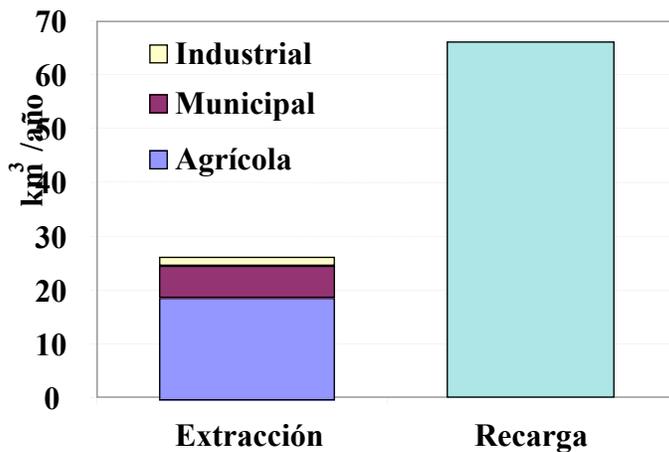
Figura 2. Principales concentraciones de habitantes en México



La Comisión Nacional del Agua ha identificado 653 acuíferos en el Territorio Nacional. Aproximadamente 200 de estos acuíferos han sido sujeto de uno o más estudios, y los volúmenes disponibles para 188 acuíferos han sido publicados en el Diario Oficial de la Federación. Esto quiere decir que dos terceras partes de los acuíferos de México no han sido cartografiados, y en los cuales no se conoce su geometría, volumen de agua disponible, y otra información básica. El agua subterránea proporciona el 70% del agua potable a los México la tercera parte de la superficie bajo riego y el 50% de la industria (Marín, 2002).

El balance nacional de agua subterránea resulta positivo en su conjunto, ya que la extracción estimada en 27.2 km³/año representa sólo el 41% de la recarga total estimada en 66.1 km³/año. Estos números sin embargo, esconden algunas realidades de México. La distribución espacio-temporal del agua es grande, y desafortunadamente para el país, la zona con la mayor abundancia, el sureste de México, no corresponde al área donde el agua es requerida (el norte de México). Esto ha resultado en problemas graves en cuanto al manejo del agua subterránea (CNA, 2001, 2002).

Figura 3. Balance global del agua en México

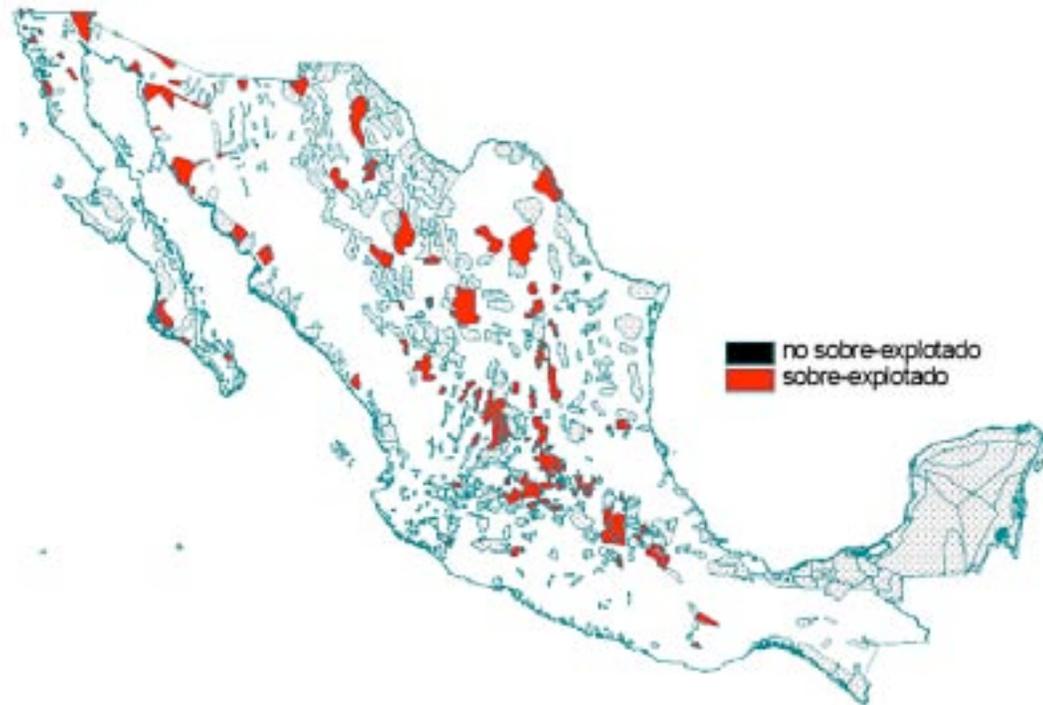


En México, existen una serie de problemas en torno al agua subterránea en México. En este trabajo se tratarán tres únicamente, a saber: a) la sobre-explotación de los acuíferos, b) contaminación de los mismos, y c) intrusión salina. En vista de la importancia que tiene el primer tema, este será tratado en gran detalle.

El mayor uso del agua subterránea ocurre en las zonas áridas y semiáridas del centro, norte y noroeste, donde el balance extracción-recarga es negativo y refleja 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 se encarece su aprovechamiento.

De los 653 acuíferos identificados por la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua, según diversos autores (Marín, 2002; Arreguim y otros, 2004; Cantú y Garduño, 2004) de 98-102 acuíferos están siendo sobre-explotados. En estos acuíferos la recarga es de unos 9.0 km³/año y la extracción de 13.9 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. El usuario más importante del agua subterránea es el sector agrícola, que utiliza un 70% de las extracciones, seguido a buena distancia por los usos público-urbano e industrial, que representan alrededor del 22% del bombeo total y poco más del 6%, respectivamente. En cuanto a los 100 acuíferos sobre explotados, las cifras expuestas reproducen prácticamente el mismo patrón que a nivel nacional, pues un 71% de las extracciones corresponden al sector agrícola, alrededor del 22% se utiliza por el uso público-urbano y casi 6% por el sector industrial. La sobre explotación conjunta resulta de 4.9 km³ anuales.

Figura 4. Acuíferos sobre-explotados



En 1975 (SRH, 1975) se identificaron 32 sitios donde los acuíferos estaban sobre explotados; desde esa fecha ese número ha aumentado sustancialmente, a 36 en 1981, 80 en 1985 y 100 actualmente. Las consecuencias de esta situación son un acelerado descenso de los niveles estáticos, un incremento de los costos de energía en el bombeo (Fig. 5), fincas con pozos operando con niveles dinámicos entre 70 y 140 m; intrusión de agua salada del mar en acuíferos costeros aparejada con la salinización de los suelos; hundimientos y grietas del suelo en áreas urbanas, con todos los daños y riesgos que ello implica, migración y contaminación de acuíferos continentales con agua de mala calidad,

causada por rocas evaporitas o descargas de aguas contaminadas en zonas cercanas. La Tabla 1 da algunos ejemplos sobre los abatimientos de tres acuíferos en los últimos 20 años (CNA, 2001 y 2002).

Tabla 1. Abatimientos de varios acuíferos en los últimos 20 años

Lugar	Abatimiento	Abatimiento/año
Aguascalientes	> 35 metros	>1.8 metros
Guaymas	23 metros	1.2 metros
Santo Domingo	10 metros	0.5 metros

Contaminación

Los problemas de contaminación en México son amplios y pueden ser vistos desde dos puntos de vista: contaminación antropogénica y contaminación natural. La contaminación antropogénica puede ser dividida en tres tipos: bacteriológica, inorgánica, y orgánica. La contaminación natural esta relacionada principalmente con áreas donde se encuentran elementos o compuestos naturales que son tóxicos como el plomo o arsénico.

Uno de los problemas más grandes que enfrenta México es la contaminación bacteriológica. Esto esta asociado principalmente a la falta de tratamiento de las aguas residuales. La cobertura de alcantarillado en el medio urbano es del 90%, en el rural es del 37%, y a nivel nacional del 76%. La capacidad instalada para el tratamiento de las aguas residuales municipales es de 81 m³/s y se tratan 51 m³/s. En la Península de Yucatán, por ejemplo, hasta hace algunos años, más del 60% de las muertes de niños menores a cinco años, era causada por patogenos transportados por el agua subterránea.

Pacheco y otros (2000) han realizado varios estudios microbiológicos en la Península de Yucatán.

Existen varios ejemplos por contaminación de elementos inorgánicos ya sea provenientes de rellenos sanitarios (Marín y otros, 2001^a) como puede ser el arsénico. Este elemento ha sido reportado en varios sitios incluyendo: La Comarca Lagunera (localizada en la parte norte de México (Molina, 2004) y Tlamacazapa, Guerrero, localizado al suroeste de la Ciudad de México (Smith, 2003). Armienta y Quere (1995) ha reportado la presencia de cromo en suelos y en el acuífero de León, Guanajuato, como producto de la intensa actividad de la producción de artículos de piel.

Estudios de compuestos orgánicos empiezan a darse a conocer en la literatura. Por ejemplo, Mazari y otros (2000) reportan la presencia de componentes orgánicos y bacteriológicos en la Ciudad de México. Marín y otros (2001b) han reportado tanto la presencia de compuestos orgánicos como inorgánicos para la Ciudad de Mérida.

La contaminación difusa es importante en México y apenas empieza a ser estudiada desde un punto de vista académico. La presencia de nitratos en el agua subterránea ha sido descrita por Pacheco y Cabrera (1997), Steinich y otros (1998), Pacheco y otros (2000). González y otros (en arbitraje) reportan sobre estrategias para el control de la maleza acuática en los canales de irrigación en el Valle del Yaqui, Sonora (noroeste de México).

II. Administración del agua

La Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos reconoce desde 1917 a la nación como propietaria del agua y autoriza al Ejecutivo Federal a administrar estos recursos y a otorgar concesiones para el uso del agua.

Comisión Nacional del Agua

La Comisión Nacional del Agua (CNA) es la entidad responsable por la administración del agua en México. Cuando fue creada, existían una oficina estatal, y seis oficinas regionales. Actualmente, se está viviendo un proceso de fusión entre las oficinas estatales y regionales. La misión de la CNA es “Administrar y preservar las aguas nacionales, con la participación de la sociedad, para lograr el uso sustentable del agua”. Para una mejor administración, México ha sido dividido en 13 regiones administrativas, las cuales no obedecen a ningún criterio técnico. La figura 4 muestra dichas regiones.

Figura 5. Regiones hidrológicas y divisiones estatales



La Ley Nacional de Aguas ha venido a reconocer normativamente el principio técnico de la unidad de gestión y del ciclo hidrológico determinando un tratamiento jurídico basado en la unidad de cuenca hidrológica donde la coordinación y la concertación entre la autoridad y los usuarios a partir del programa nacional hidráulico es uno de los elementos más importantes. Según la Ley, la cuenca, conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión del recurso hidráulico.

Por su parte, la LAN estipula las facultades del Ejecutivo Federal en materia de administración de aguas nacionales y precisa los instrumentos normativos de que dispone la Comisión Nacional del Agua para formular, implantar y evaluar la planeación hidráulica del país, administrar y custodiar las aguas nacionales, expedir títulos de concesión (los cuales son expedidos a personas y organismos particulares) y asignaciones

(las cuales se otorgan a las entidades de la administración pública) y permisos de descarga de aguas residuales, así como sus prórrogas y transmisiones, y proyectos de reglamentos de cuencas. La LAN también define a la Comisión Nacional del Agua como la “autoridad federal única en materia de agua del país” (Cantú y Garduño, 2004).

La Ley de Aguas Nacionales prevee la creación de Consejos de Cuencas. La idea es integrar dichos consejos con los representantes de los tres niveles de gobierno (federal, estatal, y municipal) con los usuarios, para tratar de realizar la gestión en forma conjunta.

A continuación se presenta como ejemplo, la figura que fue utilizada para la creación del Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán, así como la bibliografía usada en uno de los documentos originales para la creación de la misma. La Península de Yucatán ha sido, sin lugar a dudas, uno de los acuíferos más estudiados de México, desde un punto de vista académico.



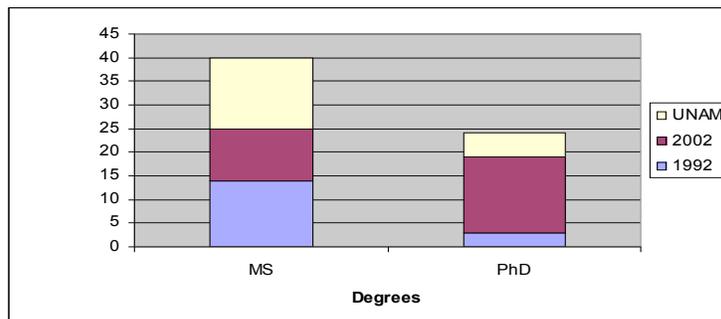
Diagnóstico de la Región XII, Península de Yucatán; CNA Gerencia Regional de la Península de Yucatán, 1997.
 Ley de Aguas Nacionales. CNA
 Modelo conceptual del acuífero de la Península de Yucatán. Villasuso Pino, Miguel y Méndez Ramos, Renán, 1996
 Programa Nacional Hidráulico 1995-2000. CNA

Uno de los organos de apoyo de los Consejos de Cuenca son los Comités Técnicos del Agua Subterránea. Un aspecto interesante, y que debilita tremendamente tanto a los Consejos de Cuenca como a los COTAS, es la falta de participación de las instituciones de educación superior en estos grupos de trabajo. A diferencia de países desarrollados como los Estados Unidos, o España, donde los académicos participan de manera activa con estos grupos, en México la ausencia de la academia es notable.

III. Recursos Humanos

Sin duda alguna uno de los aspectos más preocupantes para México es la falta de hidrogeólogos. A pesar de que los números de hidrogeólogos formados formalmente se ha incrementado en la última década, los números no son suficientes para enfrentar los problemas que México enfrenta hoy en día. En 1990 había apenas un hidrogeólogo con doctorado y 14 con maestría. En 1990 había apenas un hidrogeólogo con doctorado y 14 con maestría. En el año de 2000, ya habían 24 doctores en hidrogeología, y 40 con maestría. Aproximadamente la tercera parte de estos hidrogeólogos han sido formados en la Universidad Nacional Autónoma de México.

Figura 6. Hidrogeólogos con estudios de posgrado



Hoy en día, la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua es donde se encuentra la mayor concentración de hidrogeólogos con posgrado (maestría principalmente). La apertura por parte de los mandos medios permitió a muchos especialistas en hidráulica realizar sus estudios de posgrado a la par que trabajaban de tiempo completo.

La distribución de hidrogeólogos en México, sin ser esto una encuesta formal, es: Sector público (principalmente en la Comisión Nacional del Agua, aunque también se encuentran en otras dependencias como puede ser la Comisión Federal de Electricidad), en el sector privado (como consultores, dedicados principalmente a realizarle estudios a la Comisión Nacional del Agua, y en algunos casos, al sector privado), y en pocos centros de enseñanza superior.

Actualmente existen cuatro programas de doctorado en aguas subterráneas y tres de maestría. Los programas de doctorado incluyen a la Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones Superiores de California, al Centro de Recursos del Agua de la Universidad Autónoma de México y a la Universidad Autónoma de Nuevo León-Linares. Los programas de maestría incluyen al Instituto Tecnológico de Sonora, la Universidad Autónoma de Chihuahua, y la Universidad Autónoma de Yucatán. Claramente, estos programas son insuficientes para atender a la problemática que México enfrenta.

IV. Oportunidades

México ha venido cambiando rápidamente desde Julio 2, 2000, cuando Vicente Fox, miembro de uno de los partidos de oposición ganó las elecciones presidenciales. Bajo este nuevo liderazgo, hay una nueva apertura democrática incluyendo un acceso a la información nunca antes visto. La nueva administración se ha enfocado a tratar de mejorar la economía de México y logró pasar una ley federal de acceso a la información. Otra de sus prioridades es un nuevo plan para el manejo de los recursos naturales, en el cual el agua juega un papel estratégico para el desarrollo del país.

El Presidente de la Academia Mexicana de Ciencias creó en 2002 la Red del Agua de la Academia Mexicana de Ciencias para tener una voz independiente con respecto a los temas del agua. La misión de la Red del Agua es “Contribuir al crecimiento de México y al bienestar de sus ciudadanos, a través del manejo integral y sustentable de las aguas superficiales y subterráneas utilizando la ciencia”.

Para cumplir con esta misión, se han venido realizando una serie de actividades entre las cuales destacan: 1) un documento de análisis del agua en México titulado; 2) una colaboración muy estrecha con las principales organizaciones hidrogeológicas (International Association of Hydrogeologists; National Ground Water Association y la International Water Resources Association) para resaltar la importancia del agua

subterránea a nivel mundial; 3) crear oportunidades para la formación y fortalecimientos de redes de hidrogeólogos iberoamericanos.

Tradicionalmente, la mayoría de los miembros de los comités ejecutivos de las asociaciones profesionales eran personal de la Comisión Nacional del Agua. Si bien, uno podría decir que esto les permitía tener acceso a la información pertinente, también puede ser visto como una medida de control y de esta forma se evitaba que dichas organizaciones emitieran opiniones contrarias a la visión oficial. Actualmente, los presidentes de dos de estas asociaciones, la Asociación Geohidrológica Mexicana, A. C. (Asociación Civil) y la Asociación Mexicana de Limnología, A.C. son académicos de la Universidad Nacional Autónoma de México.

La Red del Agua de la Academia Mexicana de Ciencias convocó a académicos, miembros de organizaciones no-gubernamentales, y del sector oficial, para participar en un documento de análisis del agua en México. Originalmente, se invitaron a participar a más de 40 personas de más de 20 organizaciones diferentes. Los resultados de este análisis serán publicados como un libro cuyo título provisional es “El Agua en México: una vista desde la Academia”. Este esfuerzo es el primero de su tipo en el cual se plasma en un mismo documento la visión “oficial” así como la de diferentes sectores de la sociedad.

En el Tercer Foro Mundial sobre el Agua, que tuvo lugar en Japón en marzo de este año, se realizaron importantes esfuerzos por parte de los principales grupos de hidrogeología para resaltar la importancia del agua subterránea a nivel mundial. Dos reconocidos hidrogeólogos españoles, los profesores Ramón Llamas y Emilio Custodio, realizaron una serie de actividades encaminadas a apoyar estas actividades, como fue la publicación del libro *Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities*. Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos, no fue posible hacer que la importancia del agua subterránea fuera reconocida en la declaración ministerial de dicho foro.

En diciembre del 2003, se llevó a cabo la Asamblea General de la Inter Academy Panel (la federación de Academias de Ciencia del mundo, con más de 90 academias miembro) en la Ciudad de México. Como parte de las actividades de esta reunión trianual, se llevó a cabo un simposio satélite sobre el agua cuyo título fue “Global Importance of Groundwater”. Asimismo, en dicha reunión, la Red del Agua de la Academia Mexicana de Ciencias, presentó, a nombre de la Inter American Network of Science Academies, la propuesta “Global Water Program”, misma que esta siendo apoyado por la Real Academia de Ciencias de España.

El Programa Global del Agua tiene dos objetivos iniciales: 1) sensibilizar a la población mundial acerca de la importancia del agua subterránea y 2) empezar con un programa de cuantificación de volúmenes de agua subterránea disponible por acuífero a nivel mundial empezando con mesoamérica.

El cuarto Foro Mundial del agua tendrá lugar en México en marzo del año 2006. Las actividades mencionadas anteriormente, serán utilizadas para resaltar una vez más la importancia del agua subterránea y se volverá a trabajar para que el agua subterránea sea reconocida en la declaración ministerial.

España y México siempre han tenido excelentes relaciones académicas. Ahora se están buscando mecanismos para estrechar aún más dichas relaciones. Por ejemplo, hoy por hoy, hay una falta de hidrogeólogos con doctorado en México. Por lo tanto, las Academias de Ciencia de los dos países, están buscando mecanismos para invitar a hidrogeólogos españoles que quieran realizar estancias posdoctorales en México, y que potencialmente se integren a las plantas académicas de México. Asimismo, se está buscando promover que estudiantes mexicanos vengan a realizar sus estudios de posgrado a España.

Aproximadamente el 80% del agua potable en Centroamérica proviene del agua subterránea. Recientemente se creó una red para la formación de hidrogeólogos a nivel de maestría en Centroamérica, CARA. Originalmente, dicha red consistía de cinco universidades: la Universidad de Calgary, Canadá, la Universidad de Waterloo, Canadá, la Universidad de San Carlos, Guatemala, la Universidad de Costa Rica, y la Universidad Nacional de Nicaragua. Actualmente, ya participan más universidades como son la Universidad Autónoma del Estado de México y la Universidad Nacional Autónoma de México. El programa de CARA ha formado a la fecha 40 hidrogeólogos y se espera que se formen 20 más, antes de que termine la primera fase del programa el próximo año. La

mayoría de estos hidrogeólogos están trabajando en el sector público de sus países, y algunos de ellos, están en universidades. España y México deberían de apoyar este esfuerzo para ayudar a que algunos de estos colegas obtengan el doctorado y continúen su desarrollo profesional en los institutos de educación superior.

Conclusiones

En caso de persistir los actuales patrones de aprovechamiento del agua subterránea, habrá acuíferos sobre explotados a niveles críticos, en los que posiblemente ya no será posible garantizar un desarrollo sustentable basado en el aprovechamiento del agua subterránea.

México tiene que empezar un agresivo programa de exploración de sus recursos hidrogeológicos. No es posible que hoy en día solo hayan sido estudiados menos de la tercera parte de sus acuíferos. Esto presenta una gran oportunidad para que el sector académico pueda participar en la solución de estos problemas, sin embargo, esto no será posible, si no se cuenta con el apoyo correspondiente del gobierno, en particular a través de la creación de centros de investigación dedicados al estudio del agua, plazas para hidrogeólogos y recursos para realizar investigación en temas relacionados al agua.

Referencias

- Armienta, M.A., A. Quere, 1995, "Hydrogeochemical behavior of chromium in the unsaturated zone and in the aquifer of Leon Valley, Mexico", *Air and Soil Pollution*, 84:11-29
- Arreguim Cortés, F.I., P. Martínez Austria, V. Trueba, 2004, "El Agua en México y su Perspectiva Científica y Tecnológica", en *El Agua en México: una vista desde la academia*, B. Jiménez Cisneros, L.E. Marín, O. Escolero Fuentes, y J. Alcocer (Eds.), Academia Mexicana de Ciencias, México, D.F., México, 403 p.
- Cantú, M. y H. Garduño, 2004, "Administración de Derechos del Agua: de regularización a eje de la gestión de los recursos hidráulicos", en *El Agua en México: una vista desde la academia*, B. Jiménez Cisneros, L.E. Marín, O. Escolero Fuentes, y J. Alcocer (Eds.), Academia Mexicana de Ciencias, México, D.F., México, 403 p.
- CNA, 2001, *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*
- CNA, 2002, *Compendio Básico del Agua en México*, México, D.F., México
- Diario Oficial de la Federación, Ley de Aguas Nacionales, Diciembre, 1992
- Diario Oficial de la Federación, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, Enero, 1994
- González, R., L.E. Marín, Luis M. Tamayo, y Maribel Castro, en arbitraje, "Effects of glyphosate herbicide on freshwater species in the Yaqui River Valley, Sonora, Mexico", *Geofísica Internacional*
- Mazari y otros, 2000, "Microbial groundwater quality and health indicators in Mexico City", *Urban Ecosystems*, 4:91-103

- Marín, L.E., R.M. Leal Bautista, R. Rubio, E. Prieto, , 2001a, “Geochemistry of the Chiltepec sanitary landfill, Puebla, Mexico”, *Geofísica Internacional*, 40(4) 301-308
- Marin, L.E., B. Steinich, J. Pacheco, O.A. Escolero, 2001b, “Hydrogeology of a contaminated sole-source karst aquifer: The case of Merida, Yucatan, Mexico”, *Geofísica Internacional*, (39) #4, p. 359-365
- Marín, L.E., 2002, “Perspectives on Mexican Ground Water Resources”, *Ground Water*, Vol. 40 No.6, p.570-571
- Molina, A., 2004, “Estudio hidrogeoquímico de la Comarca Lagunera”, Tesis de maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México
- Pacheco, J., A. Cabrera, 1997, “Groundwater contamination by nitrates in the Yucatan Peninsula, Mexico”, *Hydrogeology Journal*, 5:47-53
- Pacheco, J., A. Cabrera, L.E. Marín, 2001, “Nitrate temporal and spatial patterns in twelve water supply wells, Yucatan, Mexico”, *Environmental Geology*, 40(6) 708-715
- Pacheco A., J., A. Cabrera S., L.E. Marin, 2000, “Bacteriological contamination assessment in the karstic aquifer of Yucatan, Mexico”, *Geofísica Internacional*, (39) #3, 285-291
- Smith, S.E, 2003, “Una Valoración Técnica y Social Preliminar de la Situación del Agua en Tlamacazapa, Guerrero, México”, Caminamos Juntos para Salud y Desarrollo, A. C. Cuernavaca, Morelos, México. 66 p.

SRH, 1975, Secretaría de Recursos Hidráulicos, *Plan Nacional Hidráulico*, México, D.F.,
México

Steinich, B., O. Escolero, L.E. Marín, 1998, “Salt water intrusion and nitrate
contamination in the aquifer of Valle de Hermosillo, Sonora”, *Hydrogeology
Journal*, v. 6, 518-526