

EL AGUA EN MÉXICO VISTA DESDE LA ACADEMIA

**BLANCA JIMÉNEZ
LUIS MARÍN
EDITORES**

**DANTE MORÁN
ÓSCAR ESCOLERO
JAVIER ALCOCER
COORDINADORES**



ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS

EL AGUA EN MÉXICO VISTA DESDE LA ACADEMIA

BLANCA JIMÉNEZ

LUIS MARÍN

EDITORES

DANTE MORÁN

ÓSCAR ESCOLERO

JAVIER ALCO CER

COORDINADORES

VÍCTOR H. MARTÍNEZ

EDICIÓN DIGITAL



ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS

Primera edición, 2004
Edición digital, 2005

D.R. © Academia Mexicana de Ciencias
Km 23.5 Carretera Federal México-Cuernavaca
Av. Cipreses s/n, “Casa Tlalpan”
San Andrés Totoltepec, Tlalpan
14400 México, D.F.
Tels.: (55) 5849-4905, (55) 5849-5107
y (55) 5849-5109. Fax: (55) 5849-5112
: aic@servidor.unam.mx
<http://www.amc.unam.mx>

ISBN 968-7428-22-8

Impreso en México

INTRODUCCIÓN

El problema del agua en el momento actual es de tal relevancia que se puede afirmar que la disponibilidad y manejo de este recurso fijarán los márgenes del desarrollo sustentabl. Es por ello que el gobierno en general y la Semarnat en particular afirman que es necesario conocer con precisión el comportamiento del agua y sus múltiples implicaciones. Sin embargo ¿cómo debe lograrse este conocimiento estratégico? ¿Cómo deben conjuntarse la visión de los diferentes sectores con los de la nación?, y quizá mucho más difícil de responder, ¿de qué manera se puede arribar a propuestas consensuadas entre gobierno y sociedad que efectivamente solucionen los problemas del agua?

Para estudiar el agua en México es necesario considerar el marco geográfico en que se presenta. La variedad de sus características topográficas y geográficas, su extensión (casi dos millones de kilómetros cuadrados) y la influencia de más de 11 208 km de costas.

En términos de disponibilidad, cada habitante cuenta con un poco más de 4500 m³/año, aun cuando 30% de la población se encuentra en zonas con disponibilidad *per capita* menor a la considerada como de estrés hídrico (1 700 m³/año, WRI, 2000). En cuanto al uso, 78% del agua se emplea para la agricultura, 11.5% para fines públicos urbanos, 8.5% para la industria y 2% para fines pecuarios y la acuicultura. Si bien la agricultura es la actividad que emplea más agua, hay que recordar que las 6.3 millones de hectáreas bajo riego (alrededor de 30% de la superficie agrícola) aportan más de la mitad de la producción agrícola nacional y son el pilar de la cultura rural de nuestro país. Por otra parte, según datos de la Semarnat, la calidad del agua superficial —que es la única que se mide sistemáticamente—, indica que 66% es excelente o aceptable mientras que el resto requiere tratamiento o se encuentra severamente contaminada.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, en México existen 653 acuíferos. En 1975 treinta y cinco acuíferos eran sobreexplotados (es decir, se extraía más agua de la que se recargaba). Ya para el año 2002, eran más de 100 acuíferos sobreexplotados. De la calidad del agua subterránea poco se sabe, a pesar de que constituye la fuente de abastecimiento para 75 millones de mexicanos. En cuanto a los servicios del agua, si bien 88% de la población recibe agua potable o entubada y 76 % cuenta con alcantarillado, aún hay más de 13 millones de mexicanos sin servicio en sus casas y casi 30 millones sin drenaje, la mayor parte en zonas de pobreza, rural o urbana.

Estos datos globales sirven como marco general a la visión de detalle que se encuentra en los capítulos de este libro. Tales detalles invitan a una reflexión más profunda del porqué de los problemas así como de sus posibles soluciones. Los diversos enfoques que presentan los autores dan cuenta de la complejidad del problema del agua: entenderlo y captar sus dimensiones va más allá de conocer una sustancia química, pues se requiere comprender su ocurrencia y comportamiento en la naturaleza así como entender y predecir cómo la sociedad se relaciona con el agua. Como parte de esta tarea, la sección de Geociencias de la Academia Mexicana de Ciencias ha impulsado la formación de una Red de Especialistas en Agua, cuyos miembros elaboraron el presente libro. La idea es impulsar una visión científica y técnica en la discusión, la cual no necesariamente coincide con la visión gubernamental. Para cumplir con esta meta se convocó a autores de diversas especialidades para que expresaran sus puntos de vista sobre asuntos específicos de interés nacional, regional o incluso local. A pesar de que la convocatoria fue amplia, reconocemos que no fue posible lograr el espectro completo de visiones sobre el problema, pero sí en gran medida captar un panorama representativo.

El libro presenta varios capítulos dedicados a los estudios de casos y a temas escogidos que en conjunto ilustran la situación del agua en el país. Los artículos se ordenaron en un primer grupo que aborda problemáticas regionales, y que comienzan por el centro del país (donde habita la mayor parte de los mexicanos) para, posteriormente, abordar las zonas sur y norte, con algunas situaciones muy disímiles pero otras similares en torno al problema del agua. Un segundo grupo de trabajos lo conforman los capítulos temáticos que presentan la visión institucional del problema del agua y otras contribuciones que analizan y discuten las posiciones que el gobierno ha tenido y podría tener en torno a la administración, la legislación y la participación social y privada en torno al agua.

Los más de cuarenta autores que participaron provienen del sector académico (Centro de Políticas Públicas para el Desarrollo Sustentable, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, Instituto Nacional de Salud Pública, Universidad Autónoma de Yucatán y del Centro de Geociencias, Facultad de Estudios Superiores de Iztacala, los institutos de Ecología, Geología, Geofísica, Geografía, e Ingeniería de la UNAM), gubernamental (Comisión Nacional del Agua, Comisión Federal de Electricidad y del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), industrial (Consejo Nacional de la Cámara Industrial), así como de diversas empresas y consultores privados.

Consideramos deber de la academia pugnar por que en México se conserve la riqueza que da la diversidad de disciplinas y de enfoques y exigir que el gobierno mantenga y de ser posible promueva cada vez mayores espacios para que se escuchen las voces de las instituciones de investigación y de desarrollo tecnológico relacionadas con el agua y para que todos —en la medida de su

capacidad— participen en el planteamiento de soluciones al problema del agua en México.

Estamos seguros de que la información y los análisis presentados justifican plenamente por qué hay que fomentar la educación en torno al tema del agua pues es imperativo dialogar y acelerar la construcción de los consensos que el país necesita para proponer soluciones científica y técnicamente fundamentadas, socialmente aceptadas, ambientalmente sustentables, económicamente viables e institucionalmente factibles.

Blanca E. Jiménez, Luis E. Marín y Dante Morán

ÍNDICE

Presentación	9
Introducción	11
El agua en el Valle de México <i>Blanca Elena Jiménez Cisneros, Marisa Mazari Hiriart, Ramón Domínguez Mora y Enrique Cifuentes García</i>	15
El reúso intencional y no intencional del agua en el Valle de Tula <i>Blanca Elena Jiménez Cisneros, Christina Siebe Grabach y Enrique Cifuentes García</i>	33
Problemática del agua de la Cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala <i>Javier Alcocer Durand, Óscar Arnoldo Escolero Fuentes y Luis Ernesto Marín Stillman</i>	57
Metales y metaloides. Estudio de caso: contaminación por arsénico en el agua subterránea de Zimapán, Hidalgo; problemática ambiental y enfoque metodológico <i>María Aurora Armienta Hernández y Ramiro Rodríguez Castillo</i>	79
Desecación de los lagos cráter del Valle de Santiago, Guanajuato <i>Óscar Arnoldo Escolero Fuentes y Javier Alcocer Durand</i>	99
El lago de Chapala: destino final del río Lerma <i>Anne Margaret Hansen y Manfred van Afferden</i>	117
Inducción de agua termal profunda a zonas someras: Aguascalientes, México <i>Joel Carrillo Rivera, Antonio Cardona Benavides y Thomas Hergt</i>	137
Hidrogeología de la Península de Yucatán <i>Luis Ernesto Marín Stillman, Julia Guadalupe Pacheco Ávila y Renán Méndez Ramos</i>	159
La problemática del agua en Tabasco: inundaciones y su control <i>Jesús Gracia Sánchez y Óscar Arturo Fuentes Mariles</i>	177

EL AGUA EN EL VALLE DE MÉXICO

*Blanca Jiménez C., Marisa Mazari H.,
Ramón Domínguez M. y Enrique Cifuentes G.*

INTRODUCCIÓN

El Valle de México tiene una extensión de 9 600 km² y se ubica a 2 240 msnm. Originalmente era una cuenca cerrada, la cual fue artificialmente abierta a finales del siglo XVII para evitar inundaciones. En el valle se asienta la zona urbana más grande del país, con 18 millones de habitantes y que además concentra gran parte de la actividad industrial, comercial y política del país. Todas las características anteriores intervienen en la problemática del agua, con una creciente dificultad para satisfacer la demanda, así como un sistema de gran complejidad para desalojar las aguas negras y las pluviales. Ambos aspectos llevan hoy en día a vivir en una ciudad con problemas severos ocasionados por la sobreexplotación del acuífero y el hundimiento del terreno. En este capítulo se presenta una discusión sobre el origen del problema, los efectos ocasionados, así como las posibles opciones para mejorar la situación. El problema del agua en la Ciudad de México es grave y añejo, describirlo requeriría todo un libro, sin embargo, listar soluciones factibles necesitaría no más de una página si hubiera suficiente voluntad política y aceptación social del precio que se debe pagar para implantarlas.

Hasta el siglo XVIII el Valle de México, estaba constituido por cinco lagos, los tres de mayores dimensiones eran el lago de México- Texcoco, el lago de Xochimilco y el lago de Chalco; Zumpango y Xaltocan de menores dimensiones. Debido al desecamiento y a los asentamientos humanos, hoy sólo quedan dos lagos alrededor del valle: el lago de Texcoco y el lago de Zumpango. Por otro lado, dentro de la cuenca hidrológica, no existen ríos importantes, sin embargo, hay algunos ríos intermitentes que acarrear grandes cantidades de agua en la época de lluvias (de mayo a septiembre). En términos generales, estos ríos bajan o escurren desde las montañas, principalmente del Desierto de los Leones, los Dina-mos y el Ajusco, así como de las laderas del poniente de la ciudad.

Con base en la constitución del subsuelo y el funcionamiento hidrológico, el Valle de México se ha dividido en tres subsistemas acuíferos, que forman el

acuífero regional (Lesser *et al.*, 1990). El acuífero regional está constituido por rocas volcánicas fracturadas cubiertas por depósitos lacustres y aluviales con menor conductividad hidráulica. Por esta razón, el acuífero del Valle de México es poroso, confinado en algunas áreas y semiconfinado en otras (Marín *et al.*, 2002). La hidroestratigrafía del Valle de México de la superficie hacia abajo se describe a continuación (Marín *et al.*, 2002):

- Depósitos lacustres cuaternarios con un espesor de 0 a 400 m. Estas unidades son impermeables y esporádicamente muestran fracturas. Los sedimentos superficiales con alternancias entre capas de arcillas (5–30 m de espesor) y depósitos volcánicos, localmente conocidos como capas duras, constituyen el acuitardo, que se consideraba protegía al sistema de acuíferos.
- Material volcánico y piroclástico cuaternario (0–2000 m). Estas rocas constituyen el acuífero principal de la parte sureste del valle.
- Depósitos aluviales cuaternarios con espesores que varían de menos de 1 a 10 m. Estos depósitos se encuentran preferentemente en los flancos de las montañas. También están considerados como uno de los rellenos más importantes del acuífero principal del Valle de México.

De manera general, este acuífero regional se recarga por la zona sur y poniente de la ciudad, donde desafortunadamente se incrementan en forma acelerada los asentamientos humanos, lo que por un lado ha disminuido la cantidad de agua que fluye al acuífero y, por otro, ha deteriorado su calidad con contaminantes.

BALANCE HIDRÁULICO

La Ciudad de México emplea 72.5 m³/s de agua, de los cuales 72% se extrae del subsuelo del Valle de México, 18% proviene del sistema Cutzamala, 8% del Lerma y 2% de manantiales y escurrimientos superficiales propios del valle. De esta cantidad, 10 m³/s se usan directamente en riego. Los 62.5 m³/s restantes se distribuyen a través de la red y equivalen a proporcionar 300 L/hab·d cifra a la que hay que restarle lo que se pierde por fugas (23 m³/s) y el consumo en comercios, industrias y servicios municipales (9 m³/s) de lo que resulta una dotación real *per capita* de 146 L/hab·d, que al compararlo con el recomendado por la Organización Mundial de la Salud, que va de 150 a 170 L/hab·d parece ser razonable (OMS, 1995). La tabla 1 muestra el consumo por nivel económico y se observa que sólo poco más de 5% de la población emplea consumos más altos que los recomendados por la OMS. Lo que sugiere que las campañas para inducir el ahorro del agua tendrían que dirigirse a un sector específico de la población. Incluso pudiera ser más conveniente promover otras como las de la cultura de “pago justo” en función del costo real del agua, en lugar de las de economizar agua en los domicilios. Con ello se podrían financiar los programas

para cubrir las deficiencias actuales, controlar la sobreexplotación del acuífero, suministrar agua realmente potable y tratar las aguas negras antes de ser vertidas a suelos o cuerpos de agua.

TABLA 1
CONSUMOS POR NIVEL ECONÓMICO DE LA POBLACIÓN
EN EL DISTRITO FEDERAL (DGCOH, 1998)

<i>Estrato</i>	<i>Dotación (L/hab·d)</i>	<i>Población (%)</i>
Popular	128	76.5
Medio	169	18.0
Medio alto	399	3.6
Residencial	567	1.9

PRINCIPALES EFECTOS POR LA ELEVADA DEMANDA DE AGUA

El principal efecto por la alta demanda de agua en la ciudad es la sobreexplotación del acuífero, la cual se estima en $15 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir, 40% de la recarga natural. Como consecuencia de este fenómeno, el suelo de la Ciudad de México sufre hundimientos diferenciales y aunque no existen cifras confiables sobre los costos que éstos originan es fácil deducir que son enormes, si se considera que:

- a) El hundimiento provoca que las redes de agua potable y de drenaje sufran fallas frecuentes, las primeras se fracturan mientras que las segundas pierden su pendiente. En el primer caso, 37% del agua potable se desperdicia en fugas. En tanto que para evitar las inundaciones ocasionadas por la falta de pendiente ha sido necesario construir y operar el Drenaje Profundo así como costosos sistemas de bombeo para más de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ para elevar el agua del manejo secundario al principal. Puesto que el hundimiento continúa (a razón de hasta 30 cm/año, en algunas zonas) se seguirán requiriendo enormes inversiones de este tipo.
- b) Los costos para corregir fallas en los edificios de la ciudad son también cuantiosos. Un ejemplo es el de la Catedral de la Ciudad de México en la que se ha invertido, hasta el año 2000, 32.5 millones de dólares para renivelarla (Santoyo y Ovando, 2002).
- c) Las inversiones para renivelar periódicamente las vías del Metro son cada vez más importantes y se corre el riesgo de que, en algunas partes, se sobrepase el límite de lo que se considera como mantenimiento y sean necesarias reparaciones mayores.

Adicional a lo anterior, debe considerarse el riesgo de que la Ciudad de México se inunde —y los costos que esto implicaría—, por alguna falla del Drenaje

Profundo, el cual no ha recibido mantenimiento por años, debido a que en lugar de trabajar sólo durante la época de lluvias (como debe), lo hace a lo largo de todo el año, pues el Gran Canal del Desagüe no puede transportar las aguas negras por la falta de pendiente.

DEMANDA FUTURA

El déficit actual de agua en la Ciudad de México es de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, el de la sobreexplotación, como ya se mencionó, de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ y si a ello se suma el que para el año 2010 se requerirán otros $5 \text{ m}^3/\text{s}$, se concluye que se necesitarán $25 \text{ m}^3/\text{s}$ en unos cuantos años. El desafío relativo a las fuentes potenciales de esta agua adquiere características dramáticas ya que es necesario evitar la sobreexplotación y los proyectos para importarla de otras cuencas como la de Temascaltepec (localizada a 200 km de la ciudad y a una altitud de 1200 msnm) enfrentan serias dificultades sociales y ambientales, que en el mejor de los casos, sólo implicarán transferir volúmenes inferiores a los señalados y en plazos mayores a los originalmente considerados. Otras alternativas estudiadas, para traer el agua de lugares más lejanos resultan todavía más costosas.

CALIDAD DE LAS FUENTES DE SUMINISTRO DE AGUA

La calidad del agua en la Ciudad de México es poco conocida pues no se hacen suficientes análisis en cada tipo de fuente de suministro y el agua de cada una de ellas, además, se combina en la red.

A pesar de ello y en general, se puede decir que el agua del subsuelo tiene un contenido de sólidos totales de 200 a 400 mg/L, en algunas zonas como la colonia Agrícola Oriental llega a 1000 mg/L e incluso a más de 20 000 mg/L en la zona del lago de Texcoco, el cerro de la Estrella y la sierra de Santa Catarina (Bellia *et al.*, 1992; DDF, 1985; Lesser, Sánchez y González, 1986). La variación se explica por razones naturales, la contaminación (doméstica e industrial) y por la sobreexplotación que conduce a incrementar la salinidad del agua.

Además, en Azcapotzalco, Agrícola Oriental, sierra de Santa Catarina, Iztapalapa, Milpa Alta, Tlahuac y Xochimilco se observan altas concentraciones de manganeso y particularmente de hierro (del orden de 1 a 5 mg/L), elementos presentes de manera natural (Lesser, Sánchez y González, 1986; Saade Hazin, 1998). En los pozos localizados a lo largo de la sierra de las Cruces, así como en las inmediaciones de la zona montañosa, en lo que se conoce como zona de transición, importante para la recarga del sistema de acuíferos, se reportan altas concentraciones de nitratos, amonio y coliformes fecales que indican descargas

de aguas domésticas directas al subsuelo o de lixiviados que provienen de confinamientos de residuos sólidos. En la zona sur, y por los mismos motivos, se observa presencia de amonio y coliformes fecales (Ryan, 1989).

Después de clorar el agua y antes de su distribución, se observan diferencias en la calidad del agua subterránea durante la época de secas y la de lluvias (Mazari-Hiriart *et al.*, 2002) con niveles más altos de pH, nitratos, cloroformo, bromodichlorometano, carbono orgánico total, estreptococos fecales durante la temporada seca. El nivel de trihalometanos no rebasa los 200 $\mu\text{g/L}$ del agua de suministro señalados como límite permisible en la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000), sin embargo dicho valor excede los 60 $\mu\text{g/L}$ recomendados en Estados Unidos.

En lo que concierne a la calidad microbiológica del agua subterránea, los escasos estudios realizados en la ciudad indican la presencia de coliformes totales, coliformes fecales, estreptococos fecales y otras bacterias patógenas, algunas de ellas presentes a lo largo del año, e incluso en algunos casos después de la desinfección. De hecho, se han identificado 84 microorganismos de 9 géneros que se pueden asociar con contaminación fecal humana. En particular, se ha detectado la bacteria *Helicobacter pylori* en casi 20% de las muestras, después de la cloración. En este estudio, representativo de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, se reporta deficiencia en el sistema de desinfección con cloro, lo que influye en el poco o nulo control de los microorganismos en el agua de uso y consumo humano (Mazari-Hiriart *et al.*, 2002). Aunque en México se desconoce el significado epidemiológico de la *Helicobacter pylori* en el agua (la transmisión ocurre vía fecal-oral y oral-oral), en países desarrollados esta bacteria se asocia con úlceras y cáncer gástrico, lo que podría explicar la alta incidencia observada de estas enfermedades en el país. Además, se ha demostrado la presencia de colifago MS-2, indicador de la posible presencia de virus en el agua (Mazari-Hiriart *et al.*, 1999).

La mala calidad microbiológica del agua del subsuelo se explica por las fisuras del suelo, acentuadas por el hundimiento (consecuencia de la sobreexplotación), las filtraciones del agua del drenaje hacia el acuífero y vertidos directos a éste de aguas residuales, en particular al poniente y sur de la ciudad, (Mazari-Hiriart *et al.*, 1999, 2000 y 2001). Además, se cuenta ya con estudios que demuestran la introducción de contaminantes al acuífero que provienen de rellenos sanitarios o depósitos clandestinos de basura.

En cuanto a las fuentes superficiales externas (Lerma y Cutzamala) e internas, son muy escasos los reportes sobre su calidad. Es necesario que en el futuro se realicen determinaciones con suficiente confiabilidad del contenido de materia orgánica para establecer la posible formación de trihalometanos durante la cloración, así como su calidad microbiológica.

Los datos oficiales (tabla 2) sobre el contenido de cloro residual y la calidad bacteriológica del agua que se distribuye, muestran que hay una tendencia

hacia un deterioro pues después de haber tenido entre 1991 y 1996 más de 94% de las muestras con cloro residual, en los últimos años (1998) los niveles son similares a los de 1989 (alrededor de 85-87%), lo que sin duda constituye una seria alerta.

TABLA 2
PORCENTAJE DE MUESTRAS QUE CUMPLEN CON LAS NORMAS DEL AGUA POTABLE
DE LA SECRETARÍA DE SALUD (GDF, 1999).

	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Cloro residual	85	88	92	94	94	94	93	94	94	91	87
Bacteriología	70	82	84	88	91	93	93	92	92	91	83

EL AGUA Y LA SALUD EN LA CIUDAD DE MÉXICO

En relación con los riesgos para la salud, los estudios realizados reportan una marcada estacionalidad de enfermedades diarreicas que podría estar o no relacionada con la calidad del agua. Por ejemplo, las originadas por las bacterias *Escherichia coli* y *Shigella* ocurren durante el verano, de abril a septiembre (López-Vidal *et al.*, 1990; Guerrero *et al.*, 1994) que coincide con la época calurosa y de lluvias. En contraste, las enfermedades de origen viral como rotavirus, se detectan de octubre a febrero o sea en la época seca y fría (LeBaron *et al.*, 1990).

La información sobre la calidad microbiológica del agua en la ciudad es insuficiente pues sólo se cuenta con algunos datos de coliformes fecales tradicionalmente utilizados en las normas oficiales mexicanas como indicadores de calidad, pero cuyo significado no es considerado confiable por autores como Cifuentes *et al.*, 2002. En ocasiones, pareciera que las características organolépticas (sabor y color, fundamentalmente) tienen un mejor valor predictivo que dichos indicadores. En efecto, en un estudio que buscó determinar los riesgos para la salud en niños expuestos a diferentes condiciones de consumo de agua no se pudieron obtener datos concluyentes de su utilidad indicadora (tabla 3). En este estudio, realizado en las estaciones de lluvia y de estiaje, respectivamente, la población infantil fue clasificada según la calidad bacteriológica del agua que llega a su domicilio en dos categorías: *a*) libre de coliformes fecales y *b*) con coliformes fecales o contaminada de acuerdo con la norma. Los resultados de la época de sequía revelaron ausencia de correlación estadísticamente significativa entre la calidad bacteriológica del agua y la tasa de enfermedades entéricas. Ello se puede explicar por otros mecanismos de infección como son la interrupción frecuente del abasto, el empleo de recipientes sin protección (e.g. tambos) y la ausencia de servicios sanitarios. Las variables relativas a las características organolépticas del agua (percepción del sabor u olor del agua) mostraron influencia

estacional y asociaciones estadísticamente significativas con la tasa de enfermedades diarreicas, incluso mejores que el criterio microbiológico (presencia de coliformes fecales). El resumen de estos resultados (tablas 3 y 4) permitió detectar variaciones estacionales, tanto en la tasa de enfermedades entéricas como en los factores de riesgo y de protección, antes mencionados.

TABLA 3

RIESGO DE ENFERMEDADES DIARREICAS EN LA POBLACIÓN INFANTIL
(REGRESIÓN LOGÍSTICA, N= 998 NIÑOS). XOCHIMILCO, CIUDAD DE MÉXICO (2002)

<i>Característica de la población</i>	<i>Riesgo (OR *)</i>	<i>Riesgo (OR **)</i>
Limpia (sin coliformes fecales)	1	1
Contaminada (con coliformes fecales)	1	1
Abasto continuo de agua	< 50%	1
Sabor del agua	> 70%	1
Protección del agua (recipientes con tapa)	< 30%	1
Servicios sanitarios con agua corriente	> 30%	1
Higiene deficiente de alimentos	> 220%	1
Color del agua	1	> 80%
Consumo alimentos callejeros	1	> 60%

Fuente: Cifuentes *et al.*, 2002.

* Sequía ** Lluvias

OR= Odds ratio: 1= sin diferencia significativa con la categoría de comparación.

< factor protector; > es factor de riesgo excesivo

Sólo se incluyen las asociaciones con intervalos de confianza estadísticamente significativos.

Los resultados anteriores muestran que quienes almacenan el agua en recipientes de todo tipo, manipulan sin higiene el agua, carecen de un suministro constante, o bien, no cuentan con servicios sanitarios son los que corren mayores riesgos de salud. El problema es que varios o todos estos factores confluyen en las familias más pobres.

TABLA 4

RIESGO DE INFECCIÓN POR *GIARDIA INTESTINALIS* EN LA POBLACIÓN INFANTIL
(REGRESIÓN LOGÍSTICA, N= 986 NIÑOS). XOCHIMILCO, CIUDAD DE MÉXICO (2002)

<i>Característica de la población</i>	<i>Riesgo (OR *)</i>	<i>Riesgo (OR **)</i>
Limpia (sin quistes de <i>Giardia intestinalis</i>)	1	1
Contaminada (quistes de <i>Giardia intestinalis</i>)	1	1
Higiene personal deficiente (por ejemplo, lavado de manos)	> 225%	> 93%
Sin protección del agua (recipientes sin tapa)	1	> 530%
Higiene de alimentos deficiente	1	> 240%

Fuente: Cifuentes *et al.*, (en prensa).

* Sequía. ** Lluvias.

USO Y REÚSO DEL AGUA EN LA CIUDAD DE MÉXICO

En la Ciudad de México, 80% del agua se emplea para fines municipales, 5% para la industria y 15% para riego. En otras palabras, el “usuario principal” son los habitantes. A partir de esta agua se genera en promedio anual 45 m³/s de aguas residuales. De las cuales se trata alrededor de 6.5 m³/s que se reúsan dentro del valle con ayuda de 27 plantas de tratamiento operadas por el Gobierno del Distrito Federal más 44 pertenecientes a particulares o dependencias federales (Comisión del Lago de Texcoco, Comisión Federal de Electricidad y Sedena). Del total depurado por el Gobierno del Distrito Federal (4.8 m³/s), 54% se emplea para llenar lagos recreativos y canales, 13% para regar 6500 ha agrícolas y áreas verdes, 20% se infiltra al subsuelo por medio de lagunas, 8% se reúsa en el sector industrial y 5% en el sector comercial (DGCOH, 1998). Las otras plantas tratan y reúsan 1.7 m³/s en sus propias instalaciones, principalmente para riego de áreas verdes o enfriamiento (en el caso de la CFE).

Destaca la construcción al inicio de la década de los ochenta de la planta del ex lago de Texcoco, la cual procesa 0.6 m³/s de agua negra como parte de un proyecto concebido para controlar tolvaneras, reconstituir el sistema natural perdido por el desarrollo de la ciudad y para intercambiar agua de pozos por agua tratada para el riego agrícola de zonas aledañas. La dificultad social y política para modificar el uso del agua, debido en parte al alto contenido de sales por su paso a través de los suelos de Texcoco, condujo a que el agua depurada sea vertida al lago Nabor Carrillo donde se pierde un volumen importante por evaporación.

Los 40 m³/s restantes¹ de aguas negras que salen del valle sin tratar, se emplean para el riego del Valle de Tula (Mezquital), Chiconautla y Zumpango, así como para alimentar la Presa Endhó (1.6 m³/s) cuya agua se emplea posteriormente, también para riego.

El agua negra se usa por los agricultores, no sólo por la necesidad del líquido sino por que incrementa la productividad pues contiene materia orgánica (demanda bioquímica de oxígeno) y nutrimentos para el suelo (tabla 5). Sin embargo, también genera enfermedades por helmintos (lombrices) en agricultores y consumidores de productos agrícolas regados con agua residual o insuficientemente tratada.

¹ Considerando el promedio anual y dejando a un lado los escurrimientos pluviales con promedio anual de 12 m³/s.

TABLA 5
CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DEL EMISOR PROFUNDO DURANTE 1997

Parámetro en mg/L	Secas			Lluvias		
	media	mínima	máxima	media	mínima	máxima
Demanda bioquímica de oxígeno	341	307	419	427	289	687
Sólidos disueltos totales	912	795	1001	707	255	5023
Sólidos suspendidos totales	295	60	1500	264	52	3383
Huevos de helmintos*	14	6	23	27	7	93
Nitrógeno amoniacal	23	16	43	17	0.0	57
Fosfatos	6	1	19	5	2	8

Fuente: Jiménez *et al.*, 1997.

* en organismos por litro

IMPORTANCIA DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Al conocer que toda el agua de la Ciudad de México se reusa, es común que se cuestione el porqué se deba tratar dado que hay gente interesada en ella a pesar de su calidad. Una razón es la obligación de cumplir con la normatividad actual. En este caso la NOM-001-SEMARNAT-1996, señala que las ciudades mayores de 50 000 habitantes deberían haber tratado sus aguas residuales para el año 2000. A pesar de ello, y de contar con propuestas institucionales, así como del financiamiento requerido para llevar a cabo el proyecto de tratamiento desde 1995, (Jiménez y Chávez, 1997). la construcción de las plantas no ha ocurrido. En parte por el constante cambio de funcionarios de todas las partes involucradas (Distrito Federal, Estado de México y Comisión Nacional del Agua) que han requerido aportar contribuciones en diversas ocasiones el proyecto y, por otra, por las interrogantes de a) ¿Cuál sería el efecto de promover la instalación de grandes plantas de tratamiento a la salida del Valle de México para favorecer el empleo del agua en otra región, en lugar de promover el reúso *in situ*? b) ¿Por qué dos entidades federativas (Distrito Federal y Estado de México) deben pagar por tratar el agua residual que generan si una tercera (Hidalgo) es quien la utiliza? Las respuestas de carácter ético están fuera del alcance de este capítulo, pero, desde este punto de vista, se debe considerar que la norma exige tratar el agua por el hecho de usarla y ensuciarla (principio de “quien contamina paga”), y para el caso de la Ciudad de México exige un nivel de calidad bajo, pero suficiente para su empleo en riego (una opción mucho más estricta sería el empleo para la protección ecológica o el de regresarla a su calidad original, por ejemplo). La ventaja de tratar el agua para los habitantes de la Ciudad de México sería acceder a cultivos que no sean vehículos potenciales de enfermedades y, para el país el contribuir a elevar el nivel socioeconómico de la región, al ser posible que se cultiven productos de mayor rendimiento económico, como son las hortalizas.

Otra ventaja, ni esperada ni planeada por la Ciudad de México es que el envío masivo de sus aguas negras al Valle de Tula ha recargado el acuífero de esta zona a tal grado que por su cercanía, diferencia de nivel y calidad apropiada puede ser, previo tratamiento, una posible nueva fuente de suministro (con ciertas limitantes. Véase capítulo 2 sobre el Valle de Tula).

Si ello no es suficiente para convencer al lector, se debe considerar que, como se mencionó, la principal demanda de agua y por tanto de posibilidad de reúso en la ciudad es el consumo humano. Ello implica tratar las aguas negras de la ciudad mediante sofisticados sistemas ingenieriles para inyectarla directamente a la red o al subsuelo en el acuífero local para su consumo posterior. Situaciones que tienen el inconveniente del costo, pues éste es de 60 a 120% superior al de un tratamiento primario de las aguas negras de la ciudad, permitir su uso en el Valle de Tula y recobrarla, tratarla y retornarla a la Ciudad de México para su uso. Otra desventaja, quizá más delicada y difícil de entender, es el mayor riesgo para la salud de la población que quedaría expuesta, ya que los sistemas ingenieriles tienen mayor probabilidad de falla pues tienen menor redundancia, versatilidad y amplitud de campo de acción sobre los contaminantes que los sistemas naturales de autodepuración, donde participan muchos fenómenos. Por ello, la literatura señala un mayor riesgo por el reúso directo del agua (Asano, 1998).

Para finalizar esta sección, y con el afán de promover la reflexión más allá de las opciones de tratamiento y reúso, se hace hincapié sobre el que cualesquiera de las opciones que tome el gobierno (tratar el agua negra *in situ* hasta nivel potable o hacerlo en forma parcial y recuperar el agua infiltrada en el Valle de Tula), se deberían haber iniciado serios estudios científicos y técnicos para implantar las acciones en el plazo en que el agua se requiera (2010).

NORMATIVIDAD PARA EL REÚSO EN CONSUMO HUMANO

Como parte del proceso de planeación para el reúso de agua en consumo humano es necesario contar con una normatividad apropiada. Ello puesto que universalmente es aceptado que los criterios desarrollados para agua potable, no aplican cuando de inicio se emplea agua residual, pues por definición el agua potable se obtiene a partir de fuentes de buena calidad, las cuales en principio nunca han sido usadas y por lo mismo no están contaminadas (Sayre, 1988 y Craun, 1988).

Por ello el Gobierno del Distrito Federal publicó en abril de 2004 la norma local de recarga del acuífero (NADF-003-AGUA-2002) en la *Gaceta Oficial del D.F.* En ella se indican las condiciones y requisitos de la recarga artificial en el Distrito Federal del Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Los parámetros que se consideran son similares a los de la NOM-127-SSA1-

1994, pero se suman la medición de ciertos microorganismos, compuestos de tipo orgánico, tanto derivados de la cloración como aportes de diversas fuentes (combustibles, disolventes industriales y algunos plaguicidas). Cabe señalar que el documento elaborado por el Subcomité de Calidad del Agua (UNAM-SMA/GDF, 2002) como fundamento de la norma señala que serán necesarios diversos estudios para corroborar la pertinencia de los parámetros propuestos.

OPCIONES PARA UN MEJOR MANEJO DEL AGUA

Dada la magnitud del problema, se deben realizar acciones conjuntas tanto por parte del Distrito Federal como del Estado de México. Aquellas que consideramos más importantes son: la reducción de las fugas de la red de distribución, el intercambio de agua del subsuelo que se utiliza para riego por agua tratada, la aplicación de herramientas económicas para disminuir la demanda, la educación de los diversos sectores de la sociedad (incluido el gobierno) y el reúso municipal ya sea para consumo directo, o bien, para la inyección de agua tratada al acuífero y con un tratamiento adicional para consumo humano. A continuación se hace una breve descripción de cada una de ellas.

Reducción de Fugas

El porcentaje actual de fugas (37%) representa una pérdida de 24 m³/s de agua, de tal forma que si se reduce en 10% se podrían recuperar 6 m³/s. Para ello se requiere sectorizar la red, controlar presiones y reparar selectivamente tuberías y conexiones. Esto implica programas sostenidos para realizar mediciones, estudios cuidadosos y tardados, así como una coordinación eficiente entre los sectores de los servicios públicos de la ciudad, para no dañar de nuevo las tuberías.

Intercambio del agua del subsuelo por agua tratada para riego

Muchas veces se piensa en la Ciudad de México como un área plenamente urbana. Sin embargo, dentro del valle existen aún zonas agrícolas, al norte del Distrito Federal en Tultitlán, Chalco y Xochimilco; así como en las zonas conurbadas de Ecatepec, Jaltenco, Nextlalpan, Melchor Ocampo, al nororiente de Cuautitlán y Teoloyucan. La demanda para riego es de 10 m³/s (15% del total de agua que se usa). Se podría plantear una adecuada sustitución de aguas de primer uso (que proviene de pozos), por las de reúso si éstas fuesen adecuadamente tratadas para el tipo de cultivos de la zona y se hicieran campañas de participación social que resalten y demuestren las ventajas de esta práctica. Esta opción, por su magnitud, así como la implicación que tiene en cuanto el ordenamiento del manejo del recurso, se considera urgente.

Educación

Enseñar a la sociedad a proteger, conservar y utilizar en forma racional el agua es básico. Pero más aún es enseñarle a pagar el precio del agua. Por otra parte, educar a funcionarios, industriales, organizaciones no gubernamentales e incluso a los políticos es también imprescindible. Entender que el agua debe ser manejada con criterios técnicos de largo plazo y no sólo políticos es fundamental. Cambiar de una sociedad que busca no pagar el agua a otra donde se pague el agua y se exija al gobierno invertir estos recursos financieros en el sector hidráulico y ambiental es indispensable. Ello despolitizaría, en mucho, las decisiones en torno al manejo del agua.

Herramientas económicas

Sin duda el cobro del costo real del agua es una medida para controlar la demanda y más aún para que la gente adquiriera la conciencia de su importancia. Desafortunadamente, el manejo político de no querer subir las tarifas por ningún partido político, junto con la desconfianza del pueblo sobre que sus pagos sean efectiva y eficientemente aplicados a un mejor manejo del agua, hacen que las herramientas económicas sean difíciles de aplicar en la práctica. A pesar de lo anterior, se señala que se requiere urgentemente intensificar la medición, facturación y cobro del agua, como una forma para disminuir la demanda a valores “razonables”. Sin embargo, ello debe realizarse junto con la implantación de un esquema tarifario equitativo y justo que contemple tanto las necesidades sociales como los costos del transporte, potabilización, depuración y correcta disposición del agua.

Reúso municipal

Dado el nivel actual de reúso, la única opción de interés futuro por su magnitud es el consumo humano, ya sea en forma directa o a través de su almacenamiento previo en el acuífero. En ambos casos el costo del tratamiento es el mismo, aunque para la segunda se debe además añadir el costo de inyectar y de extraer el agua del acuífero pero con la ventaja de contar con un nivel adicional de depuración y de dilución natural que hacen de esta opción una alternativa más segura.

Por otra parte —y a pesar de lo que podría pensarse—, la reinyección del acuífero no detendría en forma inmediata y directa el hundimiento del suelo, pues para ello sería necesario mantener el proceso por muchos años y frenar la sobreexplotación.

En cuanto al reúso directo de las aguas negras para consumo humano, éste sólo es practicado en Namibia, África desde hace 30 años, donde se requirió un programa científico y de desarrollo tecnológico complejo y sostenido por más de 10 años para realizarlo en forma confiable (Haarhoff y Van der Merwe, 1995). La práctica se lleva a cabo en forma intermitente (en la época de secas) y consi-

dera una dilución del agua renovada con la de primer uso de al menos uno a tres partes. En consecuencia, la tecnología para transformar un agua residual (negra) en agua para consumo humano, existe pero se precisa efectuar pruebas de tratabilidad a nivel laboratorio y escala industrial en la Ciudad de México, con el objeto de obtener criterios de diseño apropiados a la calidad del agua (dadas las diferencias entre las aguas negras de diferentes países o regiones), y definir cómo certificar la calidad potable del agua en función de los contaminantes de la localidad. En particular, se requieren estudios para avalar la calidad microbiológica (principal riesgo) y toxicológica del agua producida. Además, es necesario efectuar estudios demostrativos a nivel semi industrial, que sirvan para definir la confiabilidad del proceso, precisar los costos de inversión y de operación en las condiciones locales, así como para entrenar a los técnicos de operación. La duración estimada para todos estos estudios y trabajos es de cinco a siete años y tienen un costo estimado de 40 millones de pesos.

Otra opción de reúso

Otra opción de reúso del agua, o bien para su inyección en el acuífero de la Ciudad de México, es traer agua del acuífero del Valle de Tula, el cual se recarga artificialmente con 25 m³/s provenientes de las aguas negras de la Ciudad de México (BGS-CNA, 1998 y Jiménez *et al.*, 2000). En este caso, parte del tratamiento lo lleva a cabo la naturaleza a través del suelo, la cubierta vegetal y los cuerpos de agua (Jiménez y Chávez, en prensa). Con esta opción, se evitaría la inundación de tierras agrícolas en el Valle de Tula, por la sobresaturación del subsuelo, se disminuiría el costo del tratamiento del agua para su recuperación. También sería inferior el costo del transporte en relación con las opciones que importan agua de otras cuencas, pues el Valle de Tula se localiza a 100 km de la ciudad y a 150-300 m de diferencia en altura (Jiménez *et al.*, 1997 y Hernández y Jiménez, 2001). Sin embargo, para hacer de esta opción una operación sostenible a largo plazo se requiere tratar las aguas negras que salen de la Ciudad de México con el fin de sostener la capacidad natural de tratamiento del suelo. El costo total estimado sería de un cuarto del costo de potabilizar el agua residual dentro del Valle de México, después del tratamiento de depuración. Todo esto es técnicamente posible y al mismo tiempo se puede atender la demanda social del uso del agua para riego en el Valle de Tula.

Hay también otras acciones que consideramos no repercuten significativamente en la reducción del problema del agua en el valle y que antes de promoverlas requieren un cuidadoso análisis costo-beneficio. Algunas de ellas son las campañas para el ahorro de agua por la ciudadanía, la cosecha de agua de lluvia y el reúso industrial. A continuación se comentan con mayor detalle.

Ahorro de agua

Las campañas para usar menos agua, deben ser selectivas, porque como ya se comentó, sólo una fracción pequeña de la población consume más agua de la recomendada por organismos internacionales.

Cosecha de agua de lluvia

Si consideramos la cantidad de agua que se precipita en la Ciudad de México ($12 \text{ m}^3/\text{s}$) así como los problemas ocasionados por las inundaciones, una solución que se antoja es la cosecha de agua de lluvia de azoteas y patios. Desgraciadamente, la cantidad de agua captable y que sería posible almacenar no llega a $1 \text{ m}^3/\text{s}$, valor muy por debajo de la cantidad requerida. Por lo que, si bien puede ser una opción de nivel local, resulta costosa por la necesidad de crear sitios de almacenamiento adecuados en una ciudad con escasa disponibilidad de terreno por el hecho de que la calidad del agua de lluvia es mala por la contaminación atmosférica y porque su impacto frente a las necesidades es muy bajo.

Reúso industrial

Parece *a priori* atractivo para la zona metropolitana donde se localiza 40% de la industria del país. Sin embargo, mucha de esta industria es de escaso consumo (por ejemplo, confección de ropa) pues la altamente demandante de agua hace tiempo que se trasladó fuera del valle, o bien ya efectúa el reúso (como se mencionó existen al menos 44 plantas de tratamiento para estos fines). Además, hay dos plantas de tratamiento de agua municipal concesionadas: la de Lechería y la de Aragón, que con dificultad colocan en la industria los $0.99 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua tratada² que producen por su costo frente a las tarifas de agua potable. Aun cuando se modifiquen dichas tarifas para promover el reúso, se estima en un escenario optimista que el potencial de reúso industrial es de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ en total ($0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ en el Distrito Federal y de $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ en el Estado de México), caudal mucho menor a la producción de aguas negras ($40 \text{ m}^3/\text{s}$).

Finalmente, se debe destacar que de nada sirve producir agua renovada de alta calidad o importar agua limpia de otras cuencas si no se preservan las zonas de recarga natural y se protege la calidad del agua del sistema de acuíferos local, puesto que cualquier opción de reúso implica la dilución final con agua limpia. Es por ello urgente tomar la decisión de proteger efectivamente el acuífero del Valle de México, lo que implica detener los asentamientos humanos en las zonas de recarga natural (sur poniente, sur y oriente de la mancha urbana, en la zona de los Reyes) para preservar la cantidad así como instalar drenajes o trata-

² Ello a pesar de que su capacidad de diseño es de $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$.

mientos individuales de agua en el sur de la ciudad³ para ayudar a preservar la calidad. Se destaca que la recarga no intencional por fugas de drenaje con agua de mala calidad es del orden de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ y explica parcialmente el deterioro de la calidad del acuífero del Valle de México antes señalado.

FUTURO DEL AGUA

Si la situación presentada resulta dramática, más lo será en un futuro no lejano. Se estima que para el año 2010 habrá en el valle 21 millones de habitantes de los cuales 58% se ubicará en el Estado de México y 42% restante en el Distrito Federal. La demanda de agua se incrementará $10 \text{ m}^3/\text{s}$, que bajo el patrón actual no podrán ser suministrados. Además, es muy probable que dado el crecimiento de la mancha urbana la demanda ocurra al norte de la sierra de Guadalupe y al oriente del lago de Texcoco, por lo que las nuevas fuentes de agua, cualesquiera que sean, deberán considerar esta situación.

Bajo esta perspectiva, consideramos que ya no deben postergarse las acciones aquí planteadas, en particular, asegurar una fuente alterna viable y segura de suministro a la Ciudad de México.

Los problemas ambientales asociados con la megaciudad de México no se solucionarán con sólo aplicar tecnología, sino que requiere acciones enmarcadas dentro de un plan conceptual de largo plazo que sea aceptado socialmente. Para desarrollar dicho plan se requiere trabajo interdisciplinario que permita plantear soluciones nuevas y creativas. Independientemente de divisiones políticas y asignaciones presupuestales, el problema del agua en la ciudad nos está rebasando en todos los ámbitos y se podría incluso afirmar que es ya un problema de seguridad nacional.

BIBLIOGRAFÍA

- Asano, T., 1998, "Wastewater Reclamation and Reuse", *Water Quality Management Library*, Vol. 10, Ed. Technomic Publishing Company, Estados Unidos.
- Bellia, S., G. Cusimano, M.T. González, R.C. Rodríguez, y G. Giunta, 1992, *El Valle de México. Consideraciones preliminares sobre los riesgos geológicos y análisis hidrogeológico de la Cuenca de Chalco*, Quaderni Instituto Italo-Latino Americano, Serie Scienza, 3, Roma, Italia, 96 p.
- BGS-CNA, 1998, "Impact of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico", *Final Report, 1998*.

³ Donde las descargas de aguas negras de casas-habitación y otros establecimientos son infiltradas directamente al acuífero por la falta de drenaje en el suelo volcánico.

- Cifuentes, E., J. Villanueva y H. Sanin, 2000, "Predictors of blood lead levels in agricultural villages practicing wastewater irrigation in central México", *Env. J. Occup Environ Health*, 75, pp. 177-182.
- Cifuentes, E., L. Suárez, M. Espinosa, L. Juárez y A. Martínez Palomo, "The risk of Giardia intestinalis infection in children from an artificially recharged groundwater area, Mexico City", *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* (en prensa).
- Cifuentes, E., L. Suárez, M. Solano y R. Santos, 2002, "Diarrhea diseases in children from water reclamation site, Mexico City", *Environ Health Perspect*, 110 (9), pp. 219-624.
- Cifuentes, E., M. Gómez, U. Blumental, M. Tellez-Rojo, I. Romieu y G. Ruiz-Palacios, 2000, "Risk factors for Giardia Intestinalis infection in agricultural villages practicing wastewater irrigation in Mexico", *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 62 (3), pp. 388-392.
- Craun, G., 1988, "Surface Water Supplies and Health", *Journal of American Water Works Association*, 80, pp. 40-52.
- DDF, 1985, *Actividades geohidrológicas en el Valle de México*, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Contrato 7-33-1-0403, México.
- DGCOH, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 1998, *Compendio de la situación del agua en el Distrito Federal*, Gobierno del D.F.
- Diario Oficial de la Federación (DOF), 2000, "Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización", octubre 20, pp. 1-8.
- Gobierno del Distrito Federal (GDF), 1999, *Compendio DGCOH 1999*, Gobierno del Distrito Federal, Secretaría de Obras y Servicios, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 82 p.
- Guerrero, L., J.J. Calva, A.L. Morrow, R. Velázquez, F. Tuz-Dzib, Y. López-Vidal, H. Ortega, H. Arroyo, T.G. Cleary, L.K. Pickering y G. Ruiz-Palacios, 1994, "Asymptomatic, Shigella infections in a cohort of Mexican children younger than two years of age", *Pediatric Infectious Diseases J.*, 13, pp. 596-602.
- Haarhoff, J. y B. Van der Merwe, 1995, "Twenty five years of wastewater reclamation in Windhoke, Namibia", en Angelakis *et al.* (ed.), *Proc. of the 2nd International Symposium on Water Reclamation and Reuse*, Iraklio Crete, Grece, 17-20 octubre.
- Hernández V. y B. Jiménez, 2001, "Costos para el abastecimiento futuro del agua en la Ciudad de México", *Revista de la Federación Mexicana de Ingenieros y Ciencias Ambientales*, 52, pp. 22-26.
- Jiménez, B. y A. Chávez, 1997, "Treatment of Mexico City wastewater for irrigation purposes", *Environmental technology*, 18, pp. 721-730.
- Jiménez, B. y A. Chávez, "Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: 'El Mezquital Valley' case", *Water Science and Technology*, en prensa.

- Jiménez, B., A. Chávez, E. Barrios y R. Pérez, 2000, "Impact and potential of reused water in the Mezquital Valley", *Water*, 21, IWA, 6, pp. 31-36.
- Jiménez, B., A. Chávez y A. Capella, 1997, "Wastewater in the Valley of Mexico and its Reuse", en *70th Annual Conference and Exposition*, 7, 2/32, 311-320, IAWQ. Chicago, Illinois, Estados Unidos.
- LeBaron, C.W., J. Lew, G.I. Glass, J.M. Weber J., G. Ruiz-Palacios. The Rotavirus Study Group, 1990, "Annual Rotavirus Epidemic Patterns in North America", *J. American Medical Association*, 264 (8), pp. 983-988.
- Lesser, J.M., F. Sánchez y D. González, 1986, "Hidrogeoquímica del acuífero de la Ciudad de México", *Ingeniería Hidráulica de México*, sept.-dic., pp. 64-77.
- López-Vidal, Y., J.J. Calva, A. Trujillo, A. Ponce de León, A. Ramos, A.M. Svennerholm y G. Ruiz-Palacios, 1990, "Enterotoxins and adhesins of enterotoxigenic *Escherichia coli*: are they a risk factor for acute diarrhea in the community?", *J. Infectious Diseases*, 162, pp. 442-447.
- Marín, L.E. y Antonio Trinidad-Santos, 2002, "Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin", en Fenn, M.E., L.I. de Bauer y T. Hernández-Tejeda, *Ecological Studies Series*, 156, Springer-Verlag. New York City, Nueva York, Estados Unidos, pp. 44-67.
- Mazari-Hiriart, M., 2001, "Alivio del crítico problema del agua en la Región Central de México", en *Memoria 2001*, El Colegio Nacional, México, pp. 211-222.
- Mazari-Hiriart, M., B. Torres Beristain, E. Velázquez, J. Calva y S. Pillai, 1999, "Bacterial and viral indicators of fecal pollution in Mexico City's southern aquifer", *Journal of Environmental Science Health*, A34 (9), pp. 1715-1735.
- Mazari-Hiriart, M., E. Cifuentes, E. Velázquez y J.J. Calva, 2000, "Microbiological Groundwater Quality and Health Indicators in Mexico City", *Urban Ecosystems*, 4 (2), pp. 91-103.
- Mazari-Hiriart, M., Y. López-Vidal, G. Castillo-Rojas, S. Ponce de León y A. Cravioto, 2001, "Helicobacter pylori and Other Enteric Bacteria in Freshwater Environments in Mexico City", *Archives of Medical Research*, 32 (5), pp. 458-467.
- Mazari-Hiriart, M., Y. López-Vidal, S. Ponce de León, J.J. Calva-Mercado y F. Rojo-Callejas, 2002, "Significance of Water Quality Indicators: A case study In Mexico City", en *Proceedings of the International Conference: Water and Wastewater, Perspectives of Developing Countries*, Indian Institute of Technology Delhi-International Water Association, New Delhi, India, diciembre 11-13, pp. 407-416.
- Organización Mundial de la Salud, "Guías para la calidad de agua potable", 1995, 2ª ed., Ginebra, Suiza, Editorial OMS.
- Ryan, C.M., 1989, "An investigation of inorganic nitrogen compounds in the groundwater in the Valley of Mexico", *Geofísica Internacional*, 28 (2), pp. 417-433.

- Saade Hazin, L., 1998, "New strategy in urban water management in Mexico: the case of Mexico's Federal District. Natural", *Resources Forum*, 22 (3), pp. 185-192.
- Santoyo E. y E. Ovando-Shelley, 2002, "Underexcavation at the Tower of Pisa and at Mexico City's Metropolitan Cathedral", en *Proc. International Workshop, ISSMGE-Technical Committee TC36 Foundation Engineering in Difficult, Soft Soil Conditions*, CD edition, Mexico City.
- Sayre J., 1988, "International Standards for Drinking Water", *Journal of American Water Works Association*, 80 (1), pp. 53-60.
- UNAM/SMA y GDF, 2002, Subcomité de Calidad del Agua. Propuesta que presenta el Subcomité de Calidad del Agua sobre la definición de parámetros microbiológicos, físicos y químicos para el Anteproyecto de Norma Ambiental del Distrito Federal sobre "Condiciones y requisitos para la recarga artificial en el Distrito Federal del Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México", Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal, documento no publicado.

EL REÚSO INTENCIONAL Y NO INTENCIONAL DEL AGUA EN EL VALLE DE TULA

Blanca Jiménez C., Christina Siebe G. y Enrique Cifuentes G.

INTRODUCCIÓN

El presente capítulo ilustra dos temas. El primero trata sobre el reúso del agua en la agricultura, el cual es de interés tanto nacional como internacional, pues se practica en el país en más de 250 000 ha, y de acuerdo con la declaración de Hidebarad 2002 es crucial para el manejo integral del agua en los países en desarrollo. El segundo tema tiene que ver con el problema recientemente reconocido de la recarga incidental. Este fenómeno de recarga incidental ocurre por la infiltración no intencional de agua negra al acuífero a partir de los excedentes del riego agrícola, o bien, de las fugas de las redes de distribución o del drenaje. De esta manera, como es común en todo el mundo al igual que el uso del agua subterránea como fuente de abastecimiento público, la misma recarga incidental está propiciando el reúso de agua residual para consumo humano (Foster, 2001). En ambos sentidos, el Valle de Tula, mejor conocido como Valle del Mezquital, destaca por el hecho de ser el área más grande del mundo regada con aguas negras (Mara y Cairncros, 1989) y, muy probablemente, una de las zonas con mayor recarga incidental (superior a $25 \text{ m}^3/\text{s}$). La discusión y los resultados que presentamos a continuación describen lo que se conoce de ambos temas y son el producto de varios años de investigación de grupos con especialidades diferentes (calidad del agua, salud y suelos). A pesar de esta relativa interdisciplinariedad se reconoce que el problema es, sin duda, mucho más complejo y que independientemente de que haya o no soluciones, la necesidad de agua en la región está rebasando la capacidad de respuesta técnica, política y social.

DESCRIPCIÓN GENERAL

La zona del Mezquital se encuentra en el Valle de Tula, al sur del Estado de Hidalgo. Se localiza aproximadamente a 100 km al norte de la Ciudad de México,

entre 19° 54' y 20°30' de latitud norte y 99° 22' y 98° 56' longitud oeste a una altitud promedio de 1 900 msnm. La zona de riego abarca 85 000 ha y comprende los Distritos de Riego 03 (Tula), 100 (Alfajayucan) y 25 (Ixmiquilpan). El clima es templado subárido con temperatura media anual de 17°C, una precipitación del orden de 550 mm y evapotranspiración de 1750 mm. La época de lluvias se limita a los meses de junio a septiembre.

Los suelos (tabla 1) se clasifican como leptosoles, feozems y vertisoles. Los leptosoles son suelos poco profundos (0 a 30 cm), lo que limita el desarrollo de las raíces, la capacidad de retener agua y el contenido de nutrimentos. Su capacidad productiva es baja, y puede llegar a moderada, siempre y cuando se cuente con riego y se fertilicen adecuadamente.

Los feozems son suelos de profundidad media, ricos en materia orgánica, de texturas medias y con capacidad productiva media a alta, especialmente si se cuenta con riego. Los vertisoles son suelos profundos, de texturas medias a finas y contenidos medios a altos de materia orgánica. Son los suelos más productivos de la zona, pero son vulnerables a ensalitrarse, sobre todo si el agua de riego contiene sales.

TABLA 1
ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DEL VALLE DEL MEZQUITAL

<i>Parámetro</i>	<i>Leptosoles</i>	<i>Feozems</i>	<i>Vertisoles</i>
Valor pH	6.9-8.1	7.4-8.0	6.9-8.4
Materia orgánica	3.1-6.4	1.6-4.5	3.8-5.5
Textura	Franco arenosa a franco arcillosa	Franco arenosa a franco arcillosa	Arcilla limosa a arcilla

Fuente: Siebe, 1994.

La vegetación natural se limita a las partes montañosas y se compone de matorrales xerófilos principalmente mezquites (*Prosopis juliflora*), huizaches (*Acacia farnesiana*), yucas (*Yucca sp.*) así como una gran diversidad de cactáceas (González, 1968). Los valles están dedicados a la agricultura donde el maíz y la alfalfa representan de 60 a 80%, dependiendo del ciclo agrícola. En segundo término se cultiva avena, cebada, frijol, y en menor proporción trigo y hortalizas (chile, calabacita y betabel, entre otros).

EL RIEGO Y LA RECARGA ARTIFICIAL EN EL VALLE DE TULA

Por sus condiciones climatológicas el Valle de Tula carece de agua para la agricultura. Casi afortunadamente, a finales del siglo XVIII el agua negra de la ciudad

de México comenzó a ser enviada a esta zona a través de tres conductos: el Interceptor Poniente (1789), el Gran Canal (1898) y el Emisor Central (1975), con el doble propósito de desalojar rápidamente los excedentes de agua de lluvia para evitar inundaciones y desalojar las aguas negras. Debido a la falta de agua en el Valle de Tula, el agua que así llegaba comenzó a ser aprovechada en forma oficial en 1989 para la generación de energía eléctrica (plantas hidroeléctricas de Juandhó y La Cañada; Domínguez, 2001) aunque ya en 1912 era utilizada para el riego (Cruz Campa, 1965). De hecho, existen reportes de riegos localizados desde 1896 a partir del río Salado en Tlaxcoapan, Tlathuelilpan y Mixquiahuala.

Sorprendentemente el empleo de las aguas negras mejoró la economía de la región. Por ello en 1920, se construyó un sistema para distribuir y regular el flujo del agua negra para la agricultura que incluyó la presa Requena (figura 1) y que fue complementado en 1936 por las presas Taxhimay y Endhó.

Para 1938 toda la zona plana, entre Tula y Mixquiahuala, formaba parte del Distrito de Riego número 03. Conforme fue aumentando el volumen generado de aguas negras de la Ciudad de México se incrementó la superficie de riego de

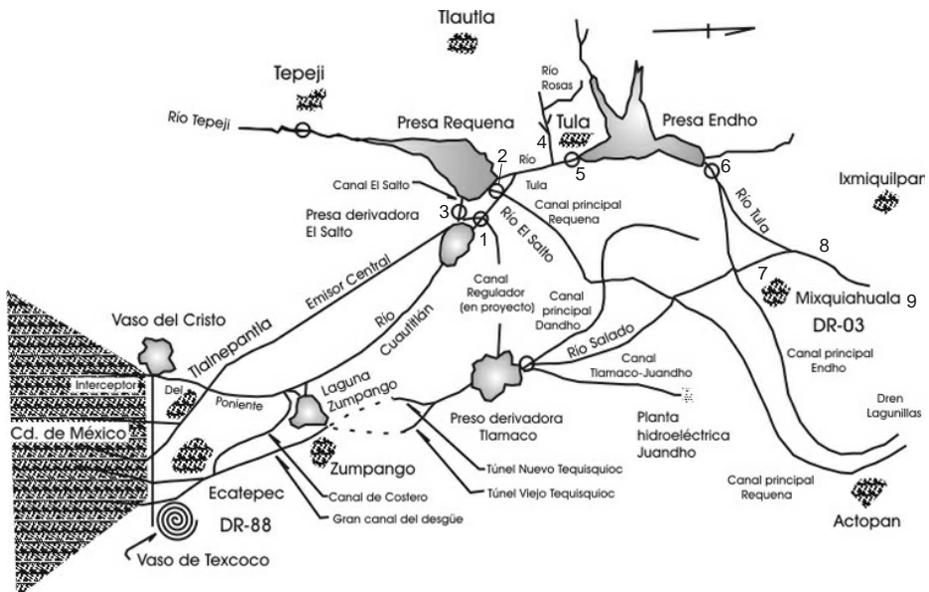


FIGURA 1. Sistema hidrológico del Valle del Mezquital y localización de los puntos de muestreo para evaluar la evolución de la calidad de las aguas negras en los cuerpos superficiales Jiménez *et al.*, 2000).

14 000 ha en 1926, a 28 000 en 1950, 42 460 en 1965, hasta alcanzar en la actualidad 85 000 hectáreas.

Sin embargo, el empleo de las aguas negras para riego no fue el único cambio ocurrido en la hidrología local. Las elevadas láminas de riego (1.5 a 2.2 m/ha-año) usadas para lavar las sales de los suelos dañinas para la agricultura así como el transporte de las aguas negras a lo largo de canales sin revestir han resultado en la recarga del acuífero local e incluso la formación de nuevos depósitos de extensiones mucho mayores a la original. En 1998, el *British Geological Survey* (BGS, 1998) calculó que dicha infiltración asciende al menos a 25 m³/s que equivalen a 13 veces la recarga natural (sin la presencia de aguas negras, Jiménez *et al.*, 1999). La recarga incidental ha ocurrido en tal magnitud y por tanto tiempo que los niveles piezométricos del agua del subsuelo se han elevado considerablemente de tal manera que hoy en día en sitios donde el agua subterránea se encontraba a 50 m de profundidad afloran manantiales con gastos de 40 a 600 L/s. Estas nuevas fuentes de agua se han constituido en el único suministro para todas las actividades de la región. Por ejemplo, el manantial de Cerro Colorado con 600 L/s es uno de los más grandes y de él se abastecen los poblados de Mangas, Tezontepec, Ajacuba y San Salvador (Jiménez *et al.*, 1997).

El exceso de agua en la región se refleja también en los cuerpos superficiales, por ejemplo, el caudal base del río Tula incrementó en casi ocho veces su valor original (de 1.6 m³/s a 13 m³/s) en 50 años (de 1945 a 1995).

MODIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

En 1995 llegaba a Tula un gasto promedio de 52 m³/s de aguas negras, de las cuales 40 m³/s escurren en forma continua a lo largo del año ya que provienen de las aguas residuales domésticas, industriales y comerciales de la Ciudad de México; los 12 m³/s restantes corresponden al valor promedio anual de los excedentes de lluvia y en realidad sólo se observan de mayo a octubre, unas horas por día y por tanto en gastos muy variables y mucho mayores al valor promedio (Domínguez, 2001). La tabla 2 muestra las características de las aguas negras que salen de la Ciudad de México en época de estiaje y de lluvias, respectivamente. Contrario a lo esperado, la calidad del agua en ambas épocas es mala, a pesar de la supuesta dilución con el agua de lluvia.

Afortunadamente la calidad del agua residual se beneficia con su recorrido hasta llegar al Valle de Tula. Ello ocurre en los cuerpos superficiales mediante la degradación biológica, la fotólisis, la desorción, la oxidación, la precipitación y la dilución. Todo este conjunto de procesos es conocido como la capacidad auto-depuradora de ríos y corrientes. También, la calidad se modifica por el paso del agua a través del suelo por la adsorción, la absorción (en plantas y suelo), la oxi-

dación, la precipitación y la degradación biológica. De hecho, estos principios son usados como técnicas de tratamiento de agua en un proceso que se conoce como “Tratamiento del agua por el suelo”. En los párrafos siguientes, se presentan los datos de la magnitud con la cual ambos fenómenos ocurren en el Valle de Tula.

TABLA 2
VALORES MEDIOS, MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE DIVERSOS PARÁMETROS
EN EL AGUA RESIDUAL DEL EMISOR CENTRAL

Parámetro ¹	Estiaje			Lluvias		
	Media	Mín	Máx	Media	Mín	Máx
DBO, mg/L	240	20	330	180	40	420
Sólidos suspendidos, mg/L	295	60	1500	264	52	3383
SAAM, mg/L	13	1.5	28	13	5	24
Grasas y aceites, mg/L	40	5	185	40	2	235
Nitrógeno, mgN-NTK/L	26	18	47	17	2	61
Fósforo, mg P-PT/L	10	1	19	8.3	0.2	27
Huevos de helmintos, H/L	14	6	23	27	7	93
Coliformes fecales, NMP/100 mL	4.9X10 ⁸	1.2X10 ⁸	5.2X10 ⁹	7.4X10 ⁸	7.1X10 ⁷	2.4X10 ⁹

Fuente: Capella, 1995.

¹ DBO es la demanda bioquímica de oxígeno y es una medida de la contaminación producida por la materia orgánica biodegradable que hay en el agua; es la responsable de consumir el oxígeno disuelto. En agua limpia, su valor es de aproximadamente 5 mg/L.

SAAM o sustancias activas al azul de metileno mide la concentración de detergentes que contaminan el agua, la concentración debiera ser cero en agua limpia.

Huevos de helmintos son los huevos que producen las lombrices que parasitan al intestino humano.

Cuerpos superficiales (ríos, canales y presas)

Para conocer cómo se modifica la calidad del agua en los cuerpos superficiales se construyeron las figuras 2 a 8 a partir de un muestreo realizado en diversos puntos del Valle de Tula (figura 1). Con ello se puede observar cómo el agua superficial se contamina a medida que recibe descargas de aguas negras y posteriormente se limpia por el fenómeno de autopurificación. De esta forma la materia orgánica biodegradable o DBO se reduce de 80 mg/L a <10 mg/L (figura 2) y los fosfatos de 4 a < 1 mg/L (figura 3). Incluso, los detergentes considerados como compuestos difíciles de eliminar son removidos (figura 4). Como resultado de todo este proceso el contenido final de oxígeno disuelto se incrementa a >5 mg/L (figura 5), valor con el cual es posible el desarrollo de peces. Por otra parte, también se observa en el trayecto del agua que el nitrógeno amoniacal prácticamente desaparece (figura 6) por su transformación en nitratos pero el aumento de 0 a 2.5 mg/L (figura 7) no explica la desaparición de todo

el nitrógeno amoniacal y que tiene que ver con la presencia del lirio acuático (esto se abordará más adelante). De todas formas, los valores obtenidos de la calidad del agua al final del valle son similares a los que se presentan a la salida de una planta de tratamiento de agua de nivel secundario y con nitrificación parcial. Sólo que en este caso la depuración ocurre por el transporte del agua a través de canales superficiales. Sin embargo, dado que el distrito de riego no es una planta de tratamiento completa no posee un sistema de desinfección, por lo que el contenido al final del trayecto de los indicadores de contaminación microbiológica, los coliformes fecales alcanzan valores de 10^4 (figura 8), en lugar de 10^3 como ocurriría en una depuradora.

Un problema adicional que ocurre en los cuerpos superficiales por el envío de aguas negras al Valle de Tula y su almacenamiento es la presencia del lirio acuático en la presa Endhó. El lirio se genera por la presencia de nitratos en el agua que como es sabido le sirven como abono; esta misma razón explica la cantidad de nitrógeno como nitratos detectables a la salida de la planta menor a la que se esperaría si todo el nitrógeno amoniacal fuese oxidado (0.02 mg/L en lugar de 10 mg/L).

Por supuesto que el problema del lirio no se refiere al consumo del nitrógeno por la planta y su eliminación del agua que de hecho es benéfico, sino que el problema radica en la proliferación de plagas de mosquitos y la pérdida de agua por esta maleza. Para evitar el crecimiento del lirio se requeriría remover el fósforo y el nitrógeno del agua negra previamente a su envío a los embalses, lo que es muy costoso, o bien, se deberá seguir eliminando la planta mecánicamente o con ayuda de herbicidas, como se hace en otras partes del mundo.

REFERENCIAS FIGS. 2-8

1. Obra de toma de la presa Requena
2. Río Tepeji (aguas 0020 debajo de Requena)
3. Descargas del Emisor Central
4. Río Tula en puente Cruz Azul
5. Río Tula puente ciudad de Tula
6. Canal de la obra de toma de la presa Endhó
7. Río Salado en puente de Tezontepec
8. Río Tula en Tezontepec
9. Río Tula en Mixquiahuala

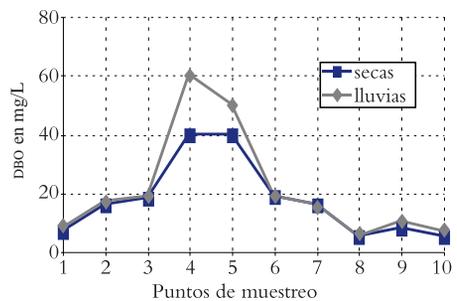


FIGURA 2. Evolución de la DBO en el 10. Río Tula en Ixmiquilpan río Tula.

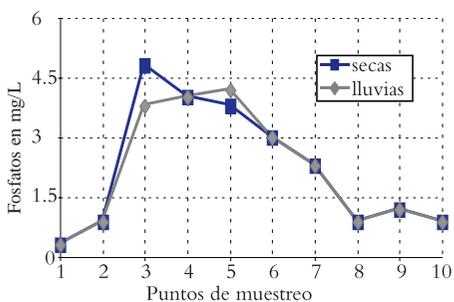


FIGURA 3. Contenido de fosfatos en el río Tula.

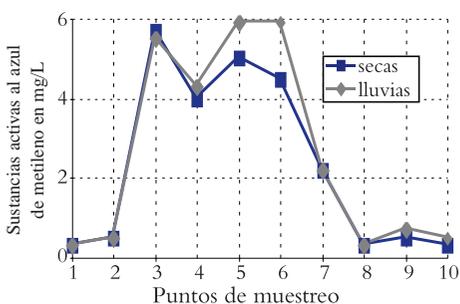


FIGURA 4. Contenido de detergentes medidos como sustancias activas al azul de metileno en el río Tula.

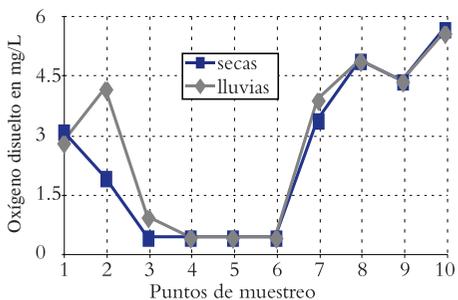


FIGURA 5. Contenido de oxígeno disuelto en el río Tula.

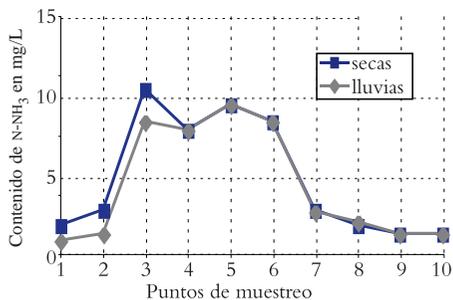


FIGURA 6. Contenido de nitrógeno amoniacal en el río Tula.

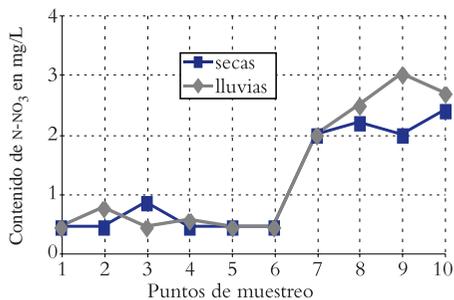


FIGURA 7. Contenido de nitratos en el río Tula.

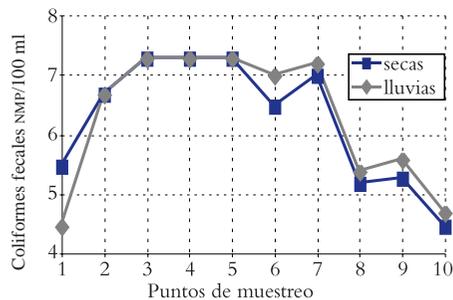


FIGURA 8. Contenido de coliformes fecales en el río Tula.

Fuente: Capella, 1995.

Desafortunadamente, después de todo el proceso de purificación natural del agua en el valle, aguas abajo de la presa Endhó, el río Tula recibe nuevamente descargas de las pequeñas colectividades de la región y el agua vuelve a estar contaminada con nitrógeno amoniacal, materia orgánica y bacterias (coliformes fecales de 10^6 - 10^7). Además, como este río se alimenta en más de 90% de los excedentes del acuífero, a parte de los contaminantes antes mencionados, el río contiene altas concentraciones de nitratos (superiores a 8 mgN/L).

TABLA 3
CALIDAD DEL AGUA EN LA OBRA DE TOMA DE LA PRESA DE ENDHÓ

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Promedio estiaje</i>	<i>Promedio lluvias</i>
Coliformes fecales	NMP/100 ml	6.5×10^6	1.0×10^7
Oxígeno disuelto	mg/L	0.15	0.25
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	17	17
Nitrógeno amoniacal	N-NH ₃	8.2	8.1
Nitratos	N-NO ₃	0.02	0.02
Fosfatos	mg/L	3.3	3.25
Huevos de helmintos	H/L		0.3

Fuente: CNA, Jiménez *et al.*, 2003

Modificación de la calidad del agua por su paso por el suelo

25 m³/s de aguas negras se infiltran al subsuelo de Tula y forman un acuífero. La tabla 4 presenta los datos sobre la calidad del agua negra a la salida del Valle de México así como cuando se encuentra ya en el subsuelo de Tula, en puntos representativos del acuífero. De esta forma se puede determinar una “eficiencia de depuración”. Se observa que la remoción varía de acuerdo con el tipo de contaminantes y depende de factores que tienen que ver con el trayecto recorrido por el agua, el tipo y la capacidad de remoción de diversos mecanismos en el suelo y la velocidad de infiltración. Las eficiencias que se obtienen son en algunos casos superiores a los de una planta de tratamiento avanzado, la mayor de las veces igual y en otras resultan negativas. Esto último es válido para los parámetros que tienen que ver con la salinidad (sólidos disueltos y conductividad) y con los nitratos, los cuales si siguen incrementando comprometerán en un futuro el empleo del agua como fuente de suministro. Preocupa, en particular, el que se desconozcan cómo se llevan a cabo los procesos de depuración en detalle y cuánto durarán, pues si se rebasa la capacidad de depuración del suelo muy probablemente la calidad del agua subterránea se deteriore marcada y rápidamente al grado de ser económicamente imposible su reaprovechamiento. Más aún podría verse afectada la salud de las comunidades de Tula. Por ello, convendría iniciar un programa amplio e interdisciplinario de investigación aplicada para definir cuánto tiempo más durará este “atípico” sistema de tratamiento para que se puedan incrementar

y preservar sus ventajas y, eventualmente, extender la práctica a otros sitios del país. Cabe señalar que lo que se considera como “atípico” en el caso del Valle de Tula es el hecho de que la descontaminación ocurra en forma no intencional pues es conocido que el suelo actúa como sistema de tratamiento y, de hecho, es una técnica de depuración usada en varias partes del mundo, en particular en las zonas áridas de Estados Unidos (Metcalf y Eddy, 1991).

TABLA 4
CALIDAD DEL AGUA CRUDA DE LOS EMISORES CENTRAL Y DEL PONIENTE
Y DE LOS POZOS UBICADOS EN EL VALLE DEL MEZQUITAL

Parámetros	Emisores Promedio	Teocalco		Tézontepec	
		Promedio	η	Promedio	η
Carbono orgánico total	112	18.0	84	28.±28	75
Demanda Bioquímica de Oxígeno	450	4.0	99	23±52	95
Demanda Química de Oxígeno	476	11	99	8.0±7.0	98
Color	140	4	97	5±2.5	96
Nitrógeno amoniacal	28	0.7	98	0.08±0.06	100
Detergentes (SAAM)	6	0.2	97	0.15±0.3	98
Sólidos disueltos	850	945±101	-11	1040	-22
Sólidos suspendidos totales	118	4	97	3.0±4.0	98
Arsénico	0.008	0.002±0.002	75	0.004±0.004	50
Boro	1.1	0.50	53	0.6±0.1	44
Cadmio	0.003	0.002	33	0.002±0.002	33
Cobre	0.07	0.015	77	0.02±0.02	69
Cromo total	0.042	0.004	90	0.004±0.003	90
Dureza total	215	325	-51	455	-110
Hierro	1	0.04	96	0.15±0.32	86
Fósforo	3	0.1	96	0.2±0.2	93
Manganeso	0.09	0.004	96	0.01±0.02	89
Níquel	0.1	0.02	85	0.01±0.02	80
Nitrógeno Total	37	1.5	96	1.6±2.8	96
Plomo	0.09	0.02	77	0.02±0.02	77
Zinc	0.22	0.04	82	0.05±0.1	77
Cianuros	0.009	0.008	11	0.006±0.005	33
Nitratos	0.8	24±27	-2900	18±17	-2150
Sulfuros	3.4	1.2	65	1.0±1.4	71
Coliformes fecales	10 ⁶	2	4 log	4.0	6 log
Coliformes totales	10 ⁷	16	6 log	27	7 log
E. histolytica	0.6	ND	100	0	100
Huevos de helmintos	20	0	100	0	100
Salmonella	POSITIVO	ND	100	0	100
Shigella	POSITIVO	ND	100	0	100

Fuente: Jiménez *et al.*, 2003, Jiménez y Chávez, en prensa y Jiménez, 2003.

η = Eficiencia.

EFECTO EN LA CALIDAD DEL SUELO

El riego con agua residual aporta al suelo una cantidad considerable de compuestos. En primer lugar, contribuye a aumentar el contenido de fósforo disponible en la capa arable de los suelos de los niveles bajos a medios (de 2 a 9 g P/m²) que se encuentran aun en los suelos de temporal (es decir, los que no reciben aguas negras sino sólo son regados con agua de lluvia) de la región, a intervalos medios a altos (14 a 25 g P/m²) en 80 años de riego. La adición de fósforo se refleja en el incremento de la productividad agrícola pues es un nutrimento mayor para las plantas (Siebe, 1998). Algo similar ocurre con el nitrógeno total, pero de manera menos pronunciada ya que de un valor de 0.2 kg N/m² que se encuentra en suelos de temporal los suelos bajo riego con aguas negras ahora contienen 0.8 kg N/m². La razón por la cual el aumento del nitrógeno es menor que la del fósforo se debe a que el segundo es muy poco móvil en el suelo y tiende a acumularse en él, mientras que el primero es mucho más soluble, por lo que una parte se lixivía, es decir, es arrastrado por el agua a estratos más profundos del suelo. Lo anterior explica los elevados contenidos de nitrógeno en forma de nitratos en las aguas freáticas y de drenaje de algunas localidades de la zona (BGS, 1998). Al igual que el fósforo y el nitrógeno, el suelo recibe materia orgánica del agua negra. En suelos regados por más de 65 años con esta agua el contenido promedio ha aumentado de 2 % a 4.6 %, lo que también beneficia la productividad del suelo.

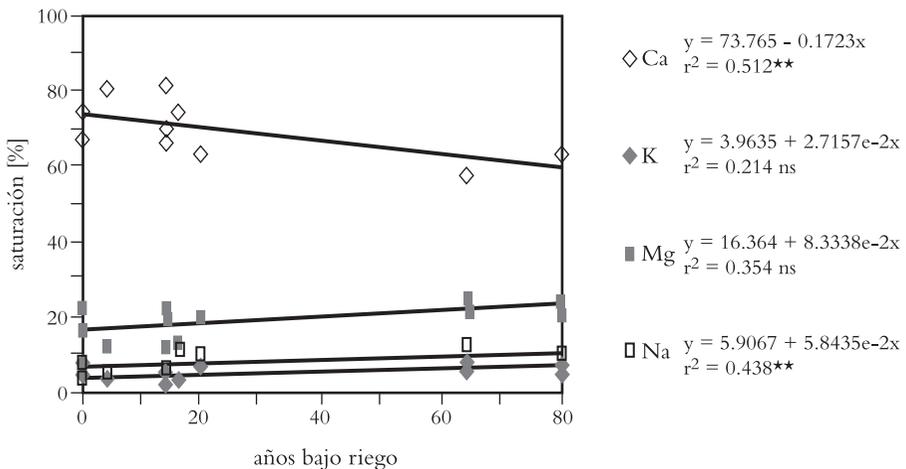


FIGURA 9. Comportamiento de la saturación de calcio, magnesio, potasio y sodio en los sitios de intercambio catiónico de los suelos de tipo vertisol (capa arable) en función del tiempo bajo riego del Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo.

Otro efecto, en esta caso negativo, es el aumento del ión sodio en los sitios de intercambio iónico en los suelos, y con ello la disminución de la saturación del ión calcio (figura 9). El ión sodio puede causar efectos tóxicos para las plantas y desplaza a otros iones, como el calcio, que son necesarios para la nutrición. Este problema es más grave en los suelos que presentan problemas de drenaje interno (como los vertisoles) y que se ubican en las partes más bajas del valle (San Salvador, Tlahuelilpan, Bojayito Chico, San José Bojay) en donde el nivel freático se encuentra a menos de 2 metros de profundidad (Hernández, 1988). De hecho, estos suelos presentan ya problemas de salinidad pues tienen una conductividad eléctrica de 8 y hasta de 40 mS/cm por lo que es necesario rehabilitarlos por medio de la construcción o profundización de drenes y aplicando láminas de sobrerriego para el lavado de sales.

En cuanto al aporte de metales, a pesar de que las concentraciones en el agua negra, son bajas y no rebasan los límites establecidos en la normatividad mexicana, el riego adiciona anualmente pequeñas cantidades (entre 0.15 a 0.28 g/m² de Pb, <0.009 a 0.011 g/m² de Cd, 0.19 a 0.40 g/m² de Cu y 0.49 a 1.13g/m² de Zn según Gutiérrez Ruiz *et al.*, 1995, Siebe, 1994). Así, en sitios regados con aguas negras por más de 80 años se observa una acumulación en la capa arable por encima de los niveles de fondo regionales de 3 a 6 veces. A pesar de ello la fracción disponible es muy baja y no se han rebasado los niveles críticos estipulados en diferentes normatividades internacionales. Como ejemplo, el Cd disponible en el suelo ha pasado de 0.5 µg/kg a 0.35 µg/kg en 80 años pero el valor del umbral preventivo es de 0.5 µg/kg según Pruess *et al.*, 1991.

Por otra parte, el riego con agua negra no sólo modifica el contenido de metales en el suelo sino que también cambia la actividad microbiana en cantidad y en calidad (Friedel *et al.*, 2000, Ortega-Larrocea *et al.*, 2001). Al inicio, el aporte de nutrientes y materia orgánica favorece el crecimiento de microorganismos pero con el tiempo (más de 65 años) se observa que la actividad microbiana disminuye por los efectos tóxicos del sodio. También, se modifica la composición de la población microbiana, pues se observa una mayor capacidad de desnitrificación (transformación de los nitratos en óxidos nitrosos y gas elemental) asociada con cierto tipo de bacterias que crecen por la presencia de fuente energética de fácil acceso como son las sustancias activas al azul de metileno, contenidas en los detergentes.

EFFECTOS EN LOS CULTIVOS

El riego con agua residual aporta al suelo materia orgánica, nitrógeno (195 kg/ha/año) y fósforo (81 kg/ha/año). La primera es benéfica para controlar la salinidad del suelo, y participa junto con los dos últimos en el incremento de la productividad agrícola de la región (tabla 5).

TABLA 5
INCREMENTO DE LA PRODUCTIVIDAD POR EL EMPLEO DE AGUA RESIDUAL
PARA RIEGO EN EL VALLE DEL MEZQUITAL

<i>Cultivo</i>	<i>Rendimiento en ton/ha</i>		<i>Incremento</i> %
	<i>agua residual</i>	<i>agua de primer uso</i>	
Maíz	5	2	150
Cebada	4	2	100
Tomate	35	18	94
Avena para forraje	22	12	83
Chile	12	7	71
Alfalfa	120	70	71
Trigo	3	1.8	67

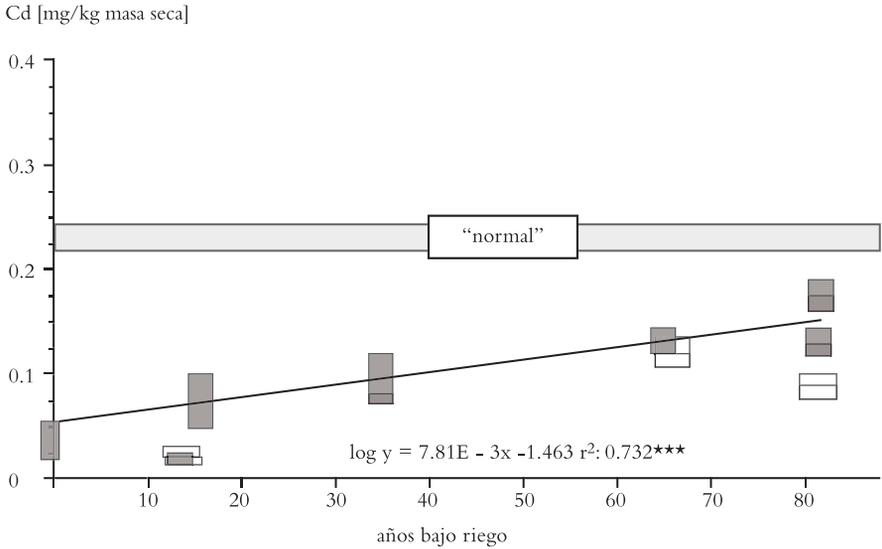
Fuente: Jiménez *et al.*, 1998.

Sin embargo, puesto que el agua residual lleva también otros compuestos, como el sodio y los metales pesados, la calidad de los cultivos cambia. Tal es el caso del sodio, cuyo contenido en la alfalfa ha aumentado de 1.5 g/kg de masa seca en sitios regados con agua de pozo a 4 g/kg de masa seca en parcelas regadas durante más de 80 años (Siebe, 1998). Otro ejemplo, es el de cadmio (figura 10) cuya concentración en alfalfa y maíz en sitios regados durante más de 65 años ha aumentado (de 0.02 a 1.8 y 0.002 a 0.04 mg/kg seco, respectivamente) aunque sin rebasar los valores umbrales de riesgo. Afortunadamente, esto no ocurre para otros metales pesados pues aun cuando se encuentran y acumulan en el suelo están inmovilizados por el pH de neutro a alcalino del suelo y que tiende a precipitar los metales. También la materia orgánica participa en la fijación ya que los retiene.

La concentración de metales en los cultivos varía. Se ha demostrado que cada cultivo absorbe cantidades distintas de metales. La avena y la calabaza, por ejemplo, absorben preferentemente níquel, mientras que el nabo y algunas malezas, como los quelites y las malvas, que son consumidos por los pobladores de la zona, absorben relativamente más cadmio (figura 11).

Así, se recomienda que para asegurar a largo plazo tanto los rendimientos como la calidad de los productos se controle el aporte de compuestos al suelo por el riego con agua residual, lo que puede lograrse con un tratamiento adecuado (Siebe, 1994, Downs *et al.*, 2000). Debe considerarse que, desde el punto de vista del suelo y de su productividad, dicho tratamiento deberá ser tal que reduzca el problema de los compuestos discutidos pero que preserve el contenido de materia orgánica en los suelos al nivel actual o incluso lo aumente pues en el caso contrario puede haber una liberación de los metales previamente acumulados, o bien que no se logre fijar en los que sigan entrando al suelo por el riego (Siebe, 1999).

ALFALFA



MAÍZ

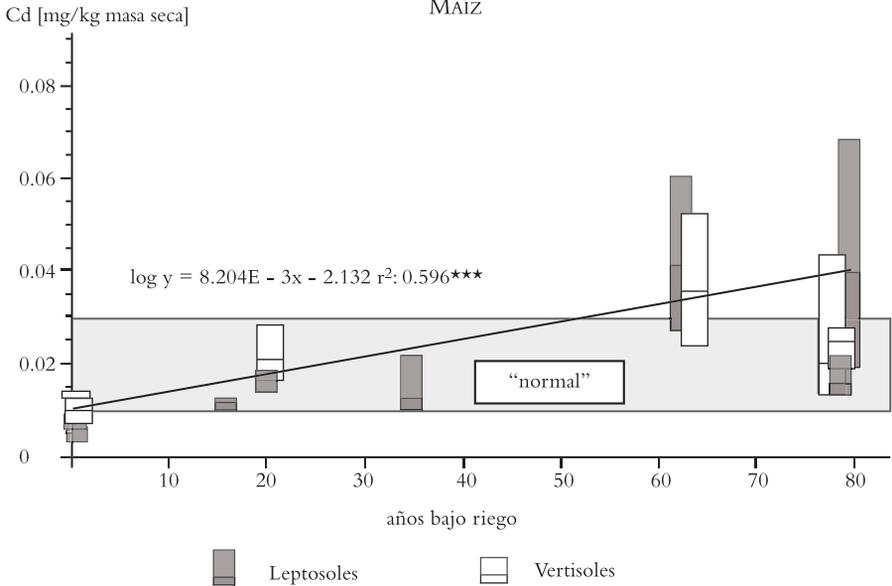


FIGURA 10. Contenidos de cadmio en tejidos de alfalfa y granos de maíz colectados de parcelas regadas durante diferentes periodos de tiempo con aguas residuales en el Distrito de Riego 03, Tula, Hgo.

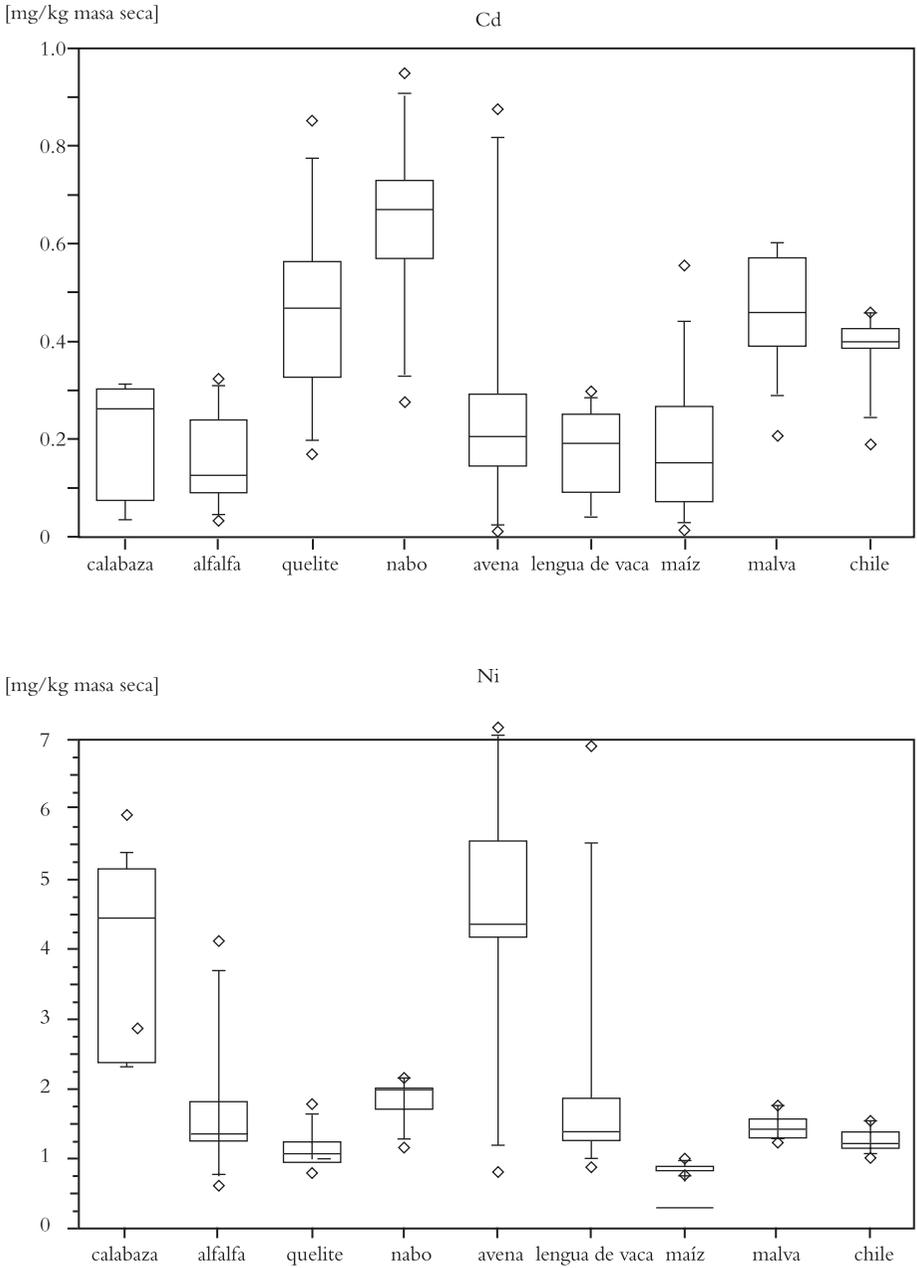


FIGURA 11. Contenidos de cadmio y níquel en diferentes cultivos colectados de parcelas con más de 65 años bajo riego en el Distrito de Riego 03, Tula, Hgo.

USO DEL AGUA DEL SUBSUELO EN EL VALLE DE TULA

En el Distrito de Riego 03 hay aproximadamente 380 000 habitantes distribuidos en 294 localidades. La única fuente de suministro de agua para estas personas es la del subsuelo, para lo cual cuentan con 206 pozos profundos y alrededor de 40 norias o manantiales. Así, del subsuelo se extraen $7.4 \text{ m}^3/\text{s}$, 64% de este volumen para fines industriales (termoeléctrica, la refinería de Tula, las cementeras Cruz Azul y Tolteca y una fenoquímica), 22% para actividades agropecuarias y 14% para consumo doméstico. Sólo el 55% de las fuentes de suministro municipal son cloradas y 52% se encuentran localizadas en las zonas de riego o cerca de los canales, por lo que reciben la influencia directa de las infiltraciones (Jiménez *et al.*, 1997).

En 1938 se comenzó a notar el cambio de calidad del agua de consumo y más que tratarse de un problema de contaminación del acuífero local como se pensaba, lo que sucedió fue la sustitución del agua original por la residual infiltrada, ya que la primera fue agotada y su lugar ocupado por el agua de recarga artificial. En otras palabras, la población local consume hoy en día el agua que proviene de la infiltración de las aguas negras de la ciudad de México, y ello lo ha realizado al menos por 30 años.

EFFECTOS EN LA SALUD POR EL USO DE AGUA RESIDUAL EN LA AGRICULTURA

Los efectos del empleo del agua residual en salud de la población del Valle del Mezquital han sido objeto de numerosas investigaciones. Desde el punto de vista epidemiológico es posible identificar cuatro zonas en función de la diferente calidad del agua:

- La primera usa aguas residuales para el riego sin tratamiento.
- La segunda emplea agua residual que después de ser almacenada en la presa Endhó experimenta cambios favorables y mejora sus características microbiológicas.
- La tercera, donde se usa el agua que, además de haber sido almacenada en la presa Endhó, se retiene en la presa Rojo Gómez (es decir que está sujeta a un doble almacenamiento) por más de ocho semanas, lo que mejora aún más su calidad microbiológica.
- La cuarta que corresponde a la zona de temporal y por ello usa agua de lluvia (sin contaminar con agua residual) y que por tanto representa el grupo de comparación o control.

La tabla 6 resume las características microbiológicas del agua usada para el riego así como la tasa de infecciones parasitarias intestinales en las zonas descritas. En dicha tabla se presentan tres tipos de microorganismos: coliformes fecales (bacterias), *Ascaris lumbricoides* (helmineto) y *Giardia intestinalis* (protozoario). Los coliformes fecales son bacterias presentes en el intestino humano que sirven como indicadores de contaminación fecal del agua. Las bacterias tienen tamaños muy pequeños (menores de 2 a 3 μm) por lo que no se eliminan por sedimentación y requieren de periodos muy prolongados de almacenamiento para que mueran por acción de la luz solar y la competencia con otros microorganismos.

Los huevecillos de *Ascaris lumbricoides* (el género de lombrices más frecuentes en el agua residual de México > 90%, Jiménez *et al.*, 2001) tienen un tamaño entre 20 y 80 μm , y pueden ser transportadas por el agua residual a través de los canales, hasta depositarse en el suelo, donde pueden permanecer viables (hasta años). Al madurar los huevecillos y ya sea por medio de las labores del campo o al consumir cultivos crudos regados con agua residual sin tratar o insuficientemente tratada pueden alcanzar al hombre (único huésped). Una vez dentro del huésped, el parásito se desarrolla hasta alcanzar la forma adulta. Las hembras de estos helmintos al ser fecundadas producen grandes cantidades de huevecillos, que al ser excretados en las heces de los individuos parasitados perpetúan la transmisión hombre-suelo-hombre. Como los huevecillos de helmintos tienen un tamaño relativamente grande, > 20 μm , basta con la retención del agua en presas o embalses (hasta 8 semanas) para disminuir su concentración en el efluente. Por ello, según las investigaciones epidemiológicas en el Valle de Tula, la doble retención del agua (en Endhó y Rojo Gómez) permite alcanzar la calidad del agua recomendada por la Organización Mundial de la Salud (1989) y reducir el riesgo de infección entre las familias de los agricultores hasta niveles similares a los detectados en la zona de temporal. De otra manera, como sucede en la población expuesta al agua residual sin tratamiento, el riesgo de infección es excesivo (Blumenthal *et al.*, 1996, Blumenthal *et al.*, 2001 y Cifuentes *et al.*, 1998).

Por otro lado, la infección por *Giardia intestinalis* posee otro comportamiento epidemiológico. Los estudios realizados en el Valle de Tula no han demostrado la asociación entre el riesgo de infección por este protozoario y el empleo de agua residual, debido a que existen otros mecanismos de transmisión (Cifuentes *et al.*, 2000).

A partir del análisis anterior, es posible construir mapas de riesgo, como el de la figura 12 que indica en el Valle de Tula existen tres zonas de incidencia de las enfermedades por helmintos (alta, media y baja).

Otra preocupación en relación con la salud pública es la relativa presencia de metales pesados en el agua, suelo y cultivos. En relación con estos metales, se han detectado concentraciones de plomo y cadmio en el agua residual que varían entre 0.01 y < 0.005 mg/L, respectivamente pero están dentro de los límites de la normatividad para el agua empleada en el riego (5 y 0.05, mg/L, respectivamente). La preocupación por parte de la población por la presencia de estos metales es por ello infundada. Según la información recabada, el contenido de dichos metales, tanto en suelos como en cultivos no ha alcanzado niveles peligrosos. En el caso del plomo, la concentración media en sangre es de 7.8 mg/dL, con valores que varían de 1.2 a 36.7 mg/dL y cerca del 20% de la población tiene niveles por arriba del valor considerado como umbral (10 mg/dL). Sin embargo, de acuerdo con la información disponible, estas concentraciones se explican por la preparación de alimentos en cerámica vidriada más que por el consumo de plomo por medio de los cultivos o el agua (Cifuentes *et al.*, 2000). En cuanto al Cd, que es el metal que pudiese preocupar más por el aumento de su contenido en suelos y cultivos, las muestras biológicas en la población del Valle de Tula señalan que un valor promedio es de 0.04 mg/g (varían entre 0.036 a 0.044 mg/g) lo cual no se traduce en riesgos inmediatos.

EFFECTOS EN LA SALUD POR EL CONSUMO DEL AGUA INFILTRADA A LOS DEPÓSITOS SUBTERRÁNEOS

Estudios realizados desde 1997 sobre la calidad del acuífero demuestran la presencia de ciertos compuestos considerados como contaminantes (Jiménez *et al.*, 1997 y Jiménez *et al.*, 1999). En uno de estos estudios se analizaron 276 parámetros (22 físicos; 34 metales, no metales y compuestos inorgánicos; 7 microbiológicos; 213 compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, pesticidas clorados, PCB's, pesticidas fosforados, trihalometanos, HTP's, toxicidad y radiactividad). Como resultado se encontró que los parámetros que siempre exceden la norma de agua potable (NOM-127-SSA1-1994) fueron: coliformes totales (22 *vs* 2 NMP/100 mL), coliformes fecales (3 *vs* 0 NMP/100 mL), nitratos (21 *vs* 10 mg/L) sodio (291 *vs* 200 mg/L), sólidos disueltos (1046 *vs* 1000 mg/L) y nitrógeno amoniacal (0.7 *vs* 0.5 mg/L). De ellos, el que pudiese preocupar más es el de los nitratos, tanto por los valores encontrados como por el hecho de que los coliformes fecales son controlados por la desinfección del agua, los otros tienen que ver más con aspectos de aceptabilidad del agua por la población que con efectos en la salud. Los niveles promedio de nitratos varían de 10.6 a 15.5 mg/L y por tanto rebasan la norma para consumo potable (10 mg/L), pero debido al elevado factor de seguridad que ésta tiene no supone riesgos significativos para la salud. En efecto, hoy

en día se habla que el nivel de 10 mg N/L de nitratos es quizá exageradamente estricto en todo el mundo.

En los estudios de calidad del agua mencionados, se encontraron problemas en casos aislados por mercurio (0.003 Vs 0.001 mg/L), plomo (0.06 vs 0.025 mg/L), hierro (0.94 Vs 0.3 mg/L) y manganeso (0.6 Vs 0.15 mg/L). En este sentido se debe estar alerta a los incrementos pues los dos primeros compuestos son tóxicos y aun cuando hoy en día las concentraciones son aún bajas, éstas pueden incrementarse alarmantemente si se rebasa la capacidad de autodepuración del suelo.

En relación con los compuestos orgánicos ninguno ha sido encontrado en el agua de consumo por arriba de los límites de detección y las pruebas de toxicidad aguda realizadas en microorganismos (Microtox® con *Photobacterium phosphoreum*), han sido negativas, es decir pareciera que no hay problemas.

Así los estudios concluyen que no obstante de que se observa influencia de las aguas residuales en los principales suministros para consumo humano de la región, la calidad puede cumplir con la norma de agua potable, en forma segura y confiable, siempre y cuando se aplique un proceso de potabilización y desinfección adecuados previo a su distribución (Jiménez *et al.*, 1997). Esto no exime de la necesidad de monitorear periódicamente el agua para conocer su evolución.

Vale la pena resaltar que, hasta ahora, se desconocen los posibles efectos en la salud por el consumo de agua del acuífero del Valle de Tula, por lo cual con vendría hacer estudios que evalúen lo anterior.

OTROS EFECTOS POR LA SOBRE RECARGA

Además de constituir una nueva fuente de agua, la sobrecarga ha originado un cambio ecológico en la región. Pues de ser el Valle de Tula una zona semidesértica, cuenta hoy en día con diversos manantiales ricos en especies (figura 13), han aparecido humedales y diversas tierras sufren hoy en día de inundaciones (Mangas, Tezontepec, Ajacuba y San Salvador) que limitan su uso a la agricultura. Además, la elevación del nivel piezométrico provoca que al aflorar el agua se pierda ésta por evaporación. Por la gran cantidad de agua acumulada en el subsuelo del Valle de Tula se piensa hoy en día que podría utilizarse incluso para satisfacer la demanda en la Ciudad de México con aportaciones de 6 a 10 m³/s (Jiménez *et al.*, 2003 y Jiménez y Chávez, en prensa), y competir con el agua que se planea traer de Temascaltepec (a 200 km de distancia y a 1200 msnm). Al hacer esto se resolvería por una parte el problema de drenaje agrícola, el de salinización de las zonas anegadas en Tula y se evitaría la pérdida por evaporación del líquido (0.95 m³/s).

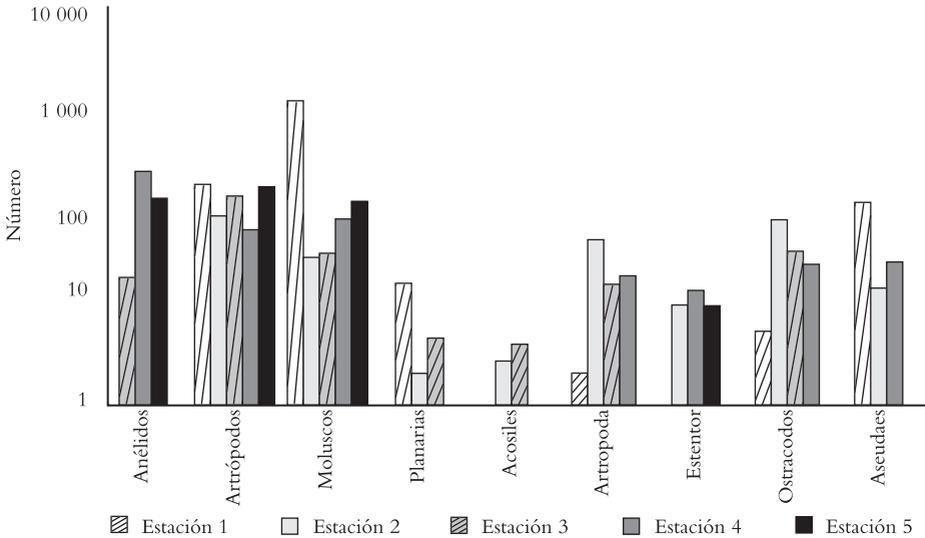


FIGURA 13. Levantamiento de la biota encontrada en Tezontepec, Manantial surgido hace 20 años.

Fuente: Jiménez y Chávez A., 1999.

CONCLUSIONES

El reúso del agua residual de la Ciudad de México para la agricultura en el Valle de Tula ha traído sin duda numerosas ventajas para la región, que tienen que ver con el simple hecho de que el desarrollo está ligado con la presencia de agua. Ello ha logrado que de forma natural muchos de los contaminantes de las aguas negras afortunadamente sean removidos o controlados por la naturaleza a través del transporte del agua y su paso por el suelo. No obstante lo anterior, estos mecanismos pueden ser rebasados y sería una irresponsabilidad que al conocer lo que ocurre (el consumo del agua negra infiltrada por más de 300 000 personas) no se tome la decisión de manejar en forma responsable el suelo de Tula como método de tratamiento, actividad que además sin duda debe estar aparejada con la depuración al menos parcial del agua de la Ciudad de México. Sin embargo, la mayor dificultad que enfrenta tomar dicha decisión es de orden político pues para lograrla tres entidades diferentes (las del Distrito Federal, y las de los estados de México e Hidalgo) deben tener muy clara la importancia de efectuar un manejo integral del agua en un marco de largo plazo. La respuesta involucra también aspectos sociales pues se discute ¿quién debiera pagar por el tratamiento del agua: quienes generan las aguas negras o quienes hacen uso de ella con beneficios?

BIBLIOGRAFÍA

- BGS, 1998, "Impact of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital valley, Hidalgo State, Mexico", en *Final Report*, British Geological Survey.
- Blumenthal, U., D. Mara, R. Ayres, E. Cifuentes, A. Peasey, R. Stott, D. Lee y G. Ruiz-Palacios, 1996, "Evaluation of the WHO nematode egg guidelines for restricted and unrestricted irrigation", *Water Science and Technology*, 33 (10-11), pp. 277-283.
- Blumenthal, U., E. Cifuentes, S. Bennett y M. Quigley, 2001, "The risk of enteric infections associated with wastewater reuse: effect of seasonality and storage", *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 95, pp. 131-137.
- Capella, A., 1995, "Feasibility study for the sanitation of the Valley of Mexico. Comisión Nacional del Agua (CAN)", *Final Report*, diciembre, 1995.
- Cifuentes, E., 1998, "The epidemiology of enteric infections in agricultural communities exposed to wastewater irrigation: Perspectives for risk control", *Int. J. Environ. Health Res.*, 8 (3), pp. 203-213.
- Cifuentes, E., J. Villanueva y H. Sanin, 2000, "Predictors of blood lead levels in agricultural villages practicing wastewater irrigation in central México", *Env. J. Occup. Environ. Health*, 75, pp. 177-178.
- Cifuentes, E., L. Suárez, M. Solano y R. Santos, 2002, "Diarrheal diseases in children from water reclamation site, Mexico City", en *Environmental Health Perspectives* (en prensa).
- Cruz Campa, S. de la, 1965, *Rehabilitación Integral del Distrito de Riego 03, Tula, Hgo.*, Tesis Profesional, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México, 163 p.
- Domínguez, R., 2001, *El sistema principal de drenaje del Área Metropolitana del Valle de México*, Series del Instituto de Ingeniería, CI-22, 34 p.
- Downs, T., E. Cifuentes, E. Ruth y I. Suffet, 2000, "Effectiveness of natural treatment in a wastewater irrigation District of the Mexico City region: a synoptic field survey", *Water Environment Research*, 72 (1), pp. 4-21.
- FAO, 1988, *Soil Map of the World. Revised Legend*, World Soil Resources Report 60, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Foster, S., 2001, "Groundwater recharge with urban wastewater reconciling resource recovery and pollution concerns in developing nations", ponencia presentada en *Experts Meeting on Health Risks in Aquifer Recharge by Reclaimed Water*, 9-10 noviembre 2001, en Budapest, Hungary, sponsored by WHO.
- Friedel, J., T. Langer, Ch. Siebe y K. Stahr, 2000, "Effects of long-term wastewater irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and activities in Central Mexico", *Biology and Fertility of Soils*, 31, pp. 414-421.
- González, L., 1968, *Tipos de Vegetación del Valle del Mezquital*, Paleoecología 2, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México, 53 p.
- Gutiérrez-Ruiz, M.E., Ch. Siebe y I. Sommer, 1995, "Effects of land application

- of wastewater from Mexico City on soil fertility and heavy metal accumulation: A bibliographical review”, *Environmental Reviews*, 3, pp. 318-330.
- Hernández, H.L., 1988, *Evaluación de las características de los suelos del Distrito de Riego 03, Tula, por el uso de agua residual en el riego agrícola*, Tesis profesional, Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional, México, 112 p.
- The Hyderabad Declaration on Wastewater Use in Agriculture*, 14 Noviembre 2002, Hyderabad, India.
- Jiménez B., 2003, “Health risks in aquifer recharge with recycle water in State of the art report health risk in aquifer recharge using reclaimed water, R. Aertgeerts y A. Angelakis (eds.), WHO Regional Office for Europe.
- Jiménez, B., C. Cruickshank, S. Capella, A. Chávez, A. Palma, R. Pérez y V. García, 1999, *Estudio de la factibilidad de empleo del agua del acuífero del Valle del Mezquital para suministro del Valle de México*, elaborado para la Comisión Nacional del Agua por el Instituto de Ingeniería, UNAM, Proyecto 8384, (diciembre), 1500 p.
- Jiménez, B., J.E. Barrios, A. Chávez y J.A. Barrios (2000), *Estudio de factibilidad del Saneamiento del Valle de México. [Actualización]*, elaborado para la Comisión Nacional del Agua por el Instituto de Ingeniería, UNAM, Proyecto 0332, 78 pp.
- Jiménez, B., J. A. Barrios, y C. Cruickshank, 2003, “Evaluation of a Wastewater Recharged Aquifer as a source of water supply”, *11th Biennial Symposium of groundwater recharge*, Arizona, Hydrological Society, Arizona Department of Water Resources, Salt River Project, U.S. Water Conservation Laboratory of USDA-ARS, Memorias en disco, JIMENEZ. Tempe, Arizona, USA.
- Jiménez, B., N. López y C. Sotomayor, 1997, *Estudio de la calidad y suministro del agua para consumo doméstico en el Valle del Mezquital*, elaborado para la Comisión Nacional del Agua por el Instituto de Ingeniería, UNAM, Proyecto 5322, 269 p.
- Jiménez, B. y A. Chávez, 1997, “Treatment of Mexico City Wastewater for Irrigation Purposes”, *Environmental Technology*, 18, pp. 721-730, Reino Unido.
- Jiménez, B. y A. Chávez, 1999, *Evaluación de la aplicabilidad de membranas para potabilizar el agua del acuífero del Mezquital*, elaborado para la Comisión Nacional del Agua por el Instituto de Ingeniería, UNAM, Proyecto 9340, Informe parcial (noviembre 1999).
- Jiménez B., A. Chávez, C. Maya y L. Jardines, 2001, “The Removal of a Diversity of Microorganisms in Different Stages of Wastewater Treatment”, *Water Science and Technology*, 43 (10), pp. 155-162, Reino Unido.
- Jiménez B. y A. Chávez, 2002, “Low Cost Technology for Reliable Use of Mexico City’s Wastewater for Agricultural Irrigation”, *Technology*, 9 (1-2) pp. 95-108, Estados Unidos.
- Jiménez B. y A. Chávez, “Quality assessment a potential use of an aquifer recharged with wastewater: ‘El Mezquital’ case”, *Water Science and Technology*, en prensa
- Mara, D. y S. Cairncross, 1989, *Guidelines for the safe use of wastewater and excreta*

- in agriculture and aquaculture*, World Health Organization, Geneva, 185 p.
- Metcalf & Eddy Inc., 1991, *Wastewater Engineering: Treatment Disposal and Reuse*, 3ed. edition Revised by Tchobanoglous, G. y F.L. Burton, McGraw-Hill Book Company Inc., Nueva York, N.Y., Estados Unidos.
- Organización Mundial de la Salud, 1989, *Health guidelines for the use of water in agriculture and aquaculture*, Technical reports No. 778, WHO, Ginebra.
- Ortega-Larrocea, M.P., C. Siebe, G. Bécard, R. Webster y I. Méndez, 2000, "Impact of a century of wastewater irrigation on the abundance of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in the Mezquital Valley of Mexico", *Applied Soil Ecology*, 16 (2), pp. 149-157.
- Pruess, A., G. Turian y V. Schweikle, 1991, "Ableitung kritischer Gehalte an NH_4NO_3 -extrahierbaren ökotoxikologisch relevanten Spurenelementen, der Böden SW-Deutschlands". *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 66 (I), pp. 385-388.
- Shuval, H.E. (ed.), 1977, *Water renovation and reuse*, Academic Press, Inc. Nueva York, N.Y.
- Siebe, Ch., 1994, "Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo", *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 10, pp. 15-21.
- Siebe, Ch., 1998, "Nutrient inputs to soils and their uptake by alfalfa through long-term irrigation with untreated sewage effluent in Mexico", *Soil Use and Management*, 13, p. 15.
- Siebe, Ch., 1999, "Monitoreo edafo-ecológico multiescalar", en Siebe, Ch., H.C. Rodarte, G. Toledo, J.D. Etchevers y Klaudia Oleschko (eds.), *Conservación y Restauración de Suelos*, Programa Universitario de Medio Ambiente, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 263-278.
- Siebe, Ch. y Cifuentes E., 1995, "Environmental impact of wastewater irrigation in central México: An overview", *Int. J. Environ. Health Res*, 5, pp. 161-173.

PRESENTACIÓN

El agua es el más importante y crítico de los recursos naturales, sobre todo para algunos países, entre ellos México. La disponibilidad de agua para una gran variedad de actividades (agrícolas, pecuarias, industriales, relacionadas con la generación de energía, con la minería, la acuicultura y los servicios públicos y recreativos, por señalar algunas), se vuelve cada vez más difícil ante la demanda creciente y el agotamiento de los acuíferos así como por la contaminación de los cuerpos de agua. El problema del agua en varias regiones del país es uno de los mayores retos no sólo para el desarrollo sino también para la supervivencia de las comunidades.

El problema del agua es un problema multifacético que requiere para su estudio de la participación de expertos de diferentes disciplinas: geólogos, químicos, biólogos, agrónomos, médicos, abogados, sociólogos, ingenieros, entre otros profesionistas. Baste mencionar que la mayor parte de los problemas de salud, como son casos de infecciones gastrointestinales agudas —disentería y cólera— están asociados a la escasez de agua potable y la contaminación de aguas y suelos. Por otra parte, la legislación y el marco administrativo que regula el uso de aguas superficiales y acuíferos tienen aún muchas deficiencias que han hecho que las instituciones atiendan en forma limitada y anacrónica los problemas del manejo integral del agua.

En este contexto, la Academia Mexicana de Ciencias integró recientemente una red de expertos para abordar el tema del agua. La Sección de Geociencias, coordinada por el Dr. Dante Morán, convocó a un grupo de expertos con formación y puntos de vista diversos: representantes del sector académico provenientes de institutos de investigación y universidades de varias regiones del país, lo mismo que especialistas del sector gubernamental y del privado. El libro *El agua en México vista desde la academia* es resultado de la discusión, reflexión y acuerdos de este grupo.

Desde hace 45 años la Academia Mexicana de Ciencias promueve la reflexión y estudios sobre problemas importantes del país, con el fin de orientar a la sociedad y al gobierno en la búsqueda de soluciones. El tema del agua ha estado entre los asuntos de preocupación de la Academia. Así, en 1995, la Academia editó el libro *El agua y la ciudad de México. Abastecimiento y drenaje. Calidad. Salud pública. Uso eficiente. Marco jurídico e institucional*, conjuntamente con la Academia Nacional de Ingeniería, la Academia Nacional de Medicina, la National Aca-

demy of Sciences y el National Research Council, los dos últimos con sede en Estados Unidos. Este importante trabajo fue coordinado por el Dr. Ismael Herrera. A nueve años de este primer libro, el lector podrá notar que lejos de resolverse el problema del agua en la ciudad de México, éste se ha agudizado en todo el país. Toca a la Academia Mexicana de Ciencias traer nuevamente el tema a la mesa de discusión para encauzar el diálogo entre los diversos sectores que conduzca a consensos y permita emprender acciones.

A nombre de la Academia Mexicana de Ciencias agradezco el trabajo de coordinación de este volumen a cargo de Blanca Jiménez, Luis Marín, Dante Morán, Óscar Escolero y Javier Alcocer, así como la colaboración de los autores que participaron en esta publicación. Estoy seguro que el nivel y calidad de los trabajos aquí reunidos servirán para concientizar, informar y educar a investigadores, responsables administrativos y gobernantes por igual; servirán también como base de una discusión necesaria entre los expertos y otros actores interesados en el problema y finalmente servirán para emprender la búsqueda de soluciones a los urgentes problemas que enfrentamos en esta materia.

JOSÉ ANTONIO DE LA PEÑA
Presidente
Academia Mexicana de Ciencias

Febrero de 2004

PROBLEMÁTICA DEL AGUA DE LA CUENCA ORIENTAL, ESTADOS DE PUEBLA, VERACRUZ Y TLAXCALA*

Javier Alcocer D., Óscar A. Escolero F. y Luis E. Marín S.

La zona tropical-subtropical del centro de México tiene condiciones climáticas que han propiciado un elevado desarrollo poblacional, que desarrollo ha desencadenado en algunas zonas procesos de alteración ambiental acelerados que requieren una evaluación profunda que genere medidas de control efectivas. La Cuenca Oriental es un ejemplo interesante de la respuesta que tiene una zona tropical-subtropical a presiones de sobreexplotación y cambio de uso de suelo.

La cuenca presenta características climáticas que la hacen altamente susceptible a la desertificación (Geréz, 1983; Golberg y García 1983; Koterba y Oliveri, 1983 y Ramírez, 1983). En los ecosistemas desertificados existe empobrecimiento, esterilidad, disminución parcial o total del potencial biológico (productividad animal y vegetal) y son incapaces de sustentar cualquier forma de vida cuando el proceso alcanza sus últimas consecuencias (Medellín-Leal, 1978).

En esta área existe una marcada escasez de agua superficial debido, por un lado, a las condiciones climáticas semiáridas de la zona, y por otro, a que la mayor parte de la superficie se encuentra formada por material de tipo cinerítico de edad reciente en el que la mayoría del agua de lluvia se infiltra debido a su carácter altamente permeable (Gasca, 1981).

La deforestación provoca, sin duda, el efecto ambiental más notable sobre el ciclo hidrológico. La vegetación cumple un importante papel en el movimiento natural del agua dado que, entre otras, realiza las funciones de intercepción del agua de lluvia, captación de la niebla, conducción de agua hacia el suelo, y regulación de la velocidad de escurrimiento. La denudación de un área tiene, por lo tanto, severos efectos sobre una porción importante del ciclo hidrológico dado que aumenta la velocidad de escurrimiento y disminuye la cantidad de agua que se infiltra. Esto a su vez produce cambios en la recarga de los acuíferos (manan-

*Los autores agradecen al Conacyt el apoyo recibido por medio del proyecto 41667.

tiales), aparición de inundaciones catastróficas, reducción de la humedad de las laderas (lo cual facilita la aparición de incendios forestales), cambios en la dinámica geomorfológica y, por supuesto, erosión (Toledo *et al.*, 1989).

En la cuenca se practica la tala y aclareo del bosque, sobrepastoreo y sobrexplotación agrícola del suelo, lo que aunado a las lluvias torrenciales que en ocasiones ocurren en el área, contribuye a acelerar los procesos erosivos (Koterba y Oliveri, 1983). Un suelo erosionado presenta una capacidad limitada para la captación de agua pluvial y, por consiguiente para la recarga de los acuíferos, en razón de la falta de vegetación y suelo.

Otros fenómenos que se ven afectados con la remoción de la vegetación son los de interceptación y captación de la niebla y su precipitación. Por ejemplo, Barradas (1983) registró que un solo individuo de una especie de pino en el Cofre de Perote, es capaz de precipitar hasta 57.9 litros de agua por hora a partir de la niebla. El acarreo desproporcionado de materiales provoca el azolve de los lagos y la pérdida de los nutrientes de los suelos. La deforestación seguramente afecta, de alguna forma, fenómenos mesoclimáticos y sobre todo microclimáticos. Ello posiblemente altere los grados de pluviosidad y de sequía en algunas zonas o regiones.

No obstante el balance positivo del agua subterránea en el ámbito nacional, regionalmente el déficit es considerable y se cubre sobrexplotando los acuíferos. Por ejemplo, en el año 2000, la Comisión Nacional del Agua reporta más de 100 acuíferos sobrexplotados. Aunque en 1981 la Cuenca Oriental no figuraba aún entre los acuíferos mexicanos sobrexplotados (Sedesol, 1993), seguramente éste lo está, como se ha reflejado en el descenso drástico del nivel de los recursos acuáticos superficiales (Alcocer y Escobar 1990; Alcocer *et al.*, 1998). En relación con lo anterior, en la Cuenca Oriental se pone en riesgo la existencia de la biota acuática en general (incluyendo la endémica) y la sustentabilidad de las actividades agrícolas presentes. Además, existen planes de abastecer a la Ciudad de México con 7 m³/s de agua procedentes del acuífero de la cuenca (SARH, 1987; NRC *et al.*, 1995), lo cual podría aumentar gravemente el problema.

Con respecto a la vegetación nativa del lugar, puede mencionarse que a la fecha se encuentra muy deteriorada, ya que desde hace aproximadamente 500 años, el uso del suelo ha venido cambiando, sustituyéndose la vegetación natural por tierras de cultivo y por zonas erosionadas (Geréz, 1983). Geréz (*op. cit.*) considera que hace aproximadamente 500 años, 60% de la superficie de la cuenca estuvo cubierta por bosques y 40% con pastizales naturales. En 1983 55% del área era utilizada agrícolamente, 21% estaba cubierta por bosques (bosque de pino, pino encino, y de *Abies religiosa*) y 15% presentaba izotal de yuca (*Yuca* sp. y *Nolina* sp.) y matorrales de lechuguilla (*Agave lechuguilla*), magueyes (*Agave* spp.) y nopales (*Opuntia* spp.). En la actualidad el área dedicada a la agricultura se ha expandido en detrimento de los otros tipos de áreas vegetadas.

Los cambios en la vegetación natural también han influido en la fauna ya que, por ejemplo, Torquemada en 1615 (*cit.* en Geréz, *op. cit.*) menciona que en la planicie de la cuenca pacían manadas de berrendos (*Antilocapra americana*), especie que ahora sólo se encuentra en algunas regiones del norte de México.

Como puede verse, es de suma importancia llevar a cabo acciones que permitan frenar el deterioro y conservar los valiosos recursos naturales de la zona, para lo cual, se considera pertinente llevar a cabo un diagnóstico integral y actual de los mismos, ya que éste es la base de la que se debe partir para elaborar una propuesta adecuada del manejo de la cuenca. Lo anterior es presentado a continuación como un estudio de caso.

Los acuíferos sobreexplotados requieren una reglamentación de extracciones, para moderar la explotación de las aguas del subsuelo y reestablecer el equilibrio. La mayor parte de explotación tiene lugar —prioritaria aunque no exclusivamente— en las porciones áridas y semiáridas del país como la que se trata en este capítulo, donde la recarga es pobre y el balance hidráulico negativo; por consiguiente se está minando el almacenamiento subterráneo.

REGIONALIZACIÓN Y ANTECEDENTES

La Cuenca Oriental (18°57'-19°44' N, 97°10'-98°05' W) se localiza, por sus características fisiográficas, en la Provincia Ecológica 57 denominada Lagos y Volcanes del Anáhuac (figura 1). De acuerdo a las agrupaciones de topoformas la zona se divide en trece sistemas terrestres o ecogeográficos (figura 2, tabla 1) denominados en lo subsecuente "Unidades Ambientales Físicas" (UAF).

Superficie, altitud y pendiente

La superficie total de la Cuenca Oriental es de 4981747 km². En orden decreciente de superficie, el ordenamiento de las UAF es el siguiente. 5704/ Perote-Tepeaca-Molcaxac (20.2%), 5742/Ciudad Serdán (16.6%), 5741/Teziutlán-Xiutetelco (11.0%), 5702/Tlaxco (10.3%), 5740/Cofre de Perote-Pico de Orizaba (10.0%), 5743/Las Derrumbadas (8.0%), 5701/Huilapitzo (6.8%), 5704B/San José Chiapa (4.4%), 5707/Tlaxcala (4.2%), 5704C/San Salvador El Seco (3.0%), 5744/Soltepec (2.2%), 5708/La Malinche (1.7%) y 5704A/Huamantla (1.6%).

A pesar de que la menor altura de la cuenca se encuentra situada a una elevada altitud similar a la de la Ciudad de México, la mayor parte de ella (80.1%) se localiza por debajo de los 2700 msnm. El resto (19.9%) fluctúa entre 2700 y 5610 msnm, la mayor altitud reportada para México, el Pico de Orizaba. Escasamente, 2.1%, se localiza por encima de los 3500 msnm. Sin embargo, 47.7% de la cuenca se localiza entre los 2350 y los 2500 msnm. Este factor —altitud—

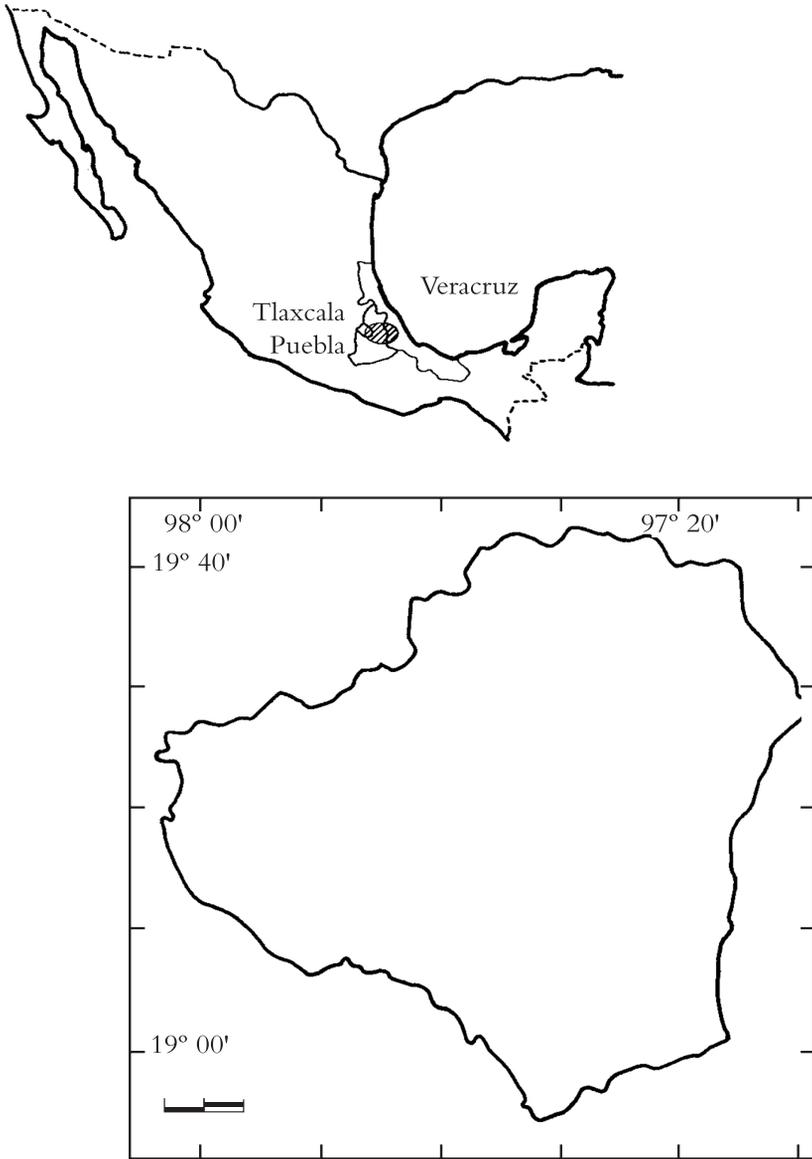


FIGURA 1. Localización y ubicación geográfica de la Cuenca Oriental.

es muy importante ya que ha sido decisivo para considerar a la Cuenca Oriental como fuente potencial de suministro de agua para las ciudades de Puebla y México ya que, al estar situada a una altura similar a estas ciudades, disminuyen grandemente los gastos de bombeo.

TABLA 1
UNIDADES AMBIENTALES FÍSICAS (UAF, SISTEMAS TERRESTRES)
DE LA CUENCA ORIENTAL

Núm.	Clave	UAF	Núm.	Clave	UAF
1	5701	Huilapitzo	8	5708	La Malinche
2	5702	Tlaxco	9	5740	Cofre de Perote-Pico de Orizaba
3	5704	Perote-Tepeaca-Molcaxac	10	5741	Teziutlán-Xiutetelco
4	5704A	Huamantla	11	5742	Ciudad Serdán
5	5704B	San José Chiapa	12	5743	Las Derrumbadas
6	5704C	San Salvador El Seco	13	5744	Soltepec
7	5707	Tlaxcala			

Fuente: Alcocer *et al.*, no publicado.

Clima

Los climas de un área están determinados por la temperatura y la cantidad de lluvia, características que a su vez están determinadas por una serie de factores geográficos, dentro de los cuales destacan por su importancia la latitud y la altitud.

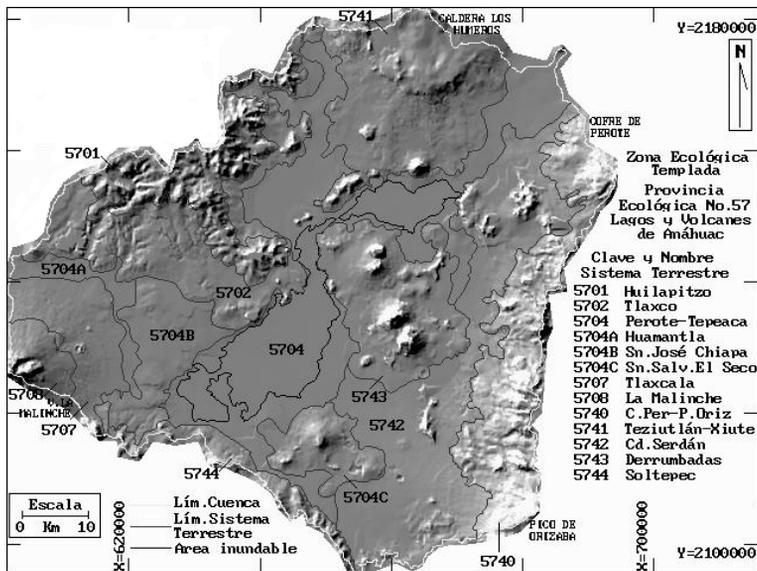


FIGURA 2. Mapa Digital del Terreno y Unidades Ambientales Físicas (uaf) de la Cuenca Oriental.

La Cuenca Oriental se encuentra ubicada entre los 18°57' y los 19°44' de latitud Norte. Por su latitud, el área de estudio se localiza al sur del Trópico de Cáncer, es decir, en la zona tropical del país. Así mismo, la Cuenca Oriental presenta altitudes que van desde los 2 300 msnm en la mayor parte de la superficie de la cuenca, hasta los 4 461 msnm en La Malinche, 4 250 msnm en el Cofre de Perote y 5 610 msnm en el Pico de Orizaba. De acuerdo con la latitud, el clima de la cuenca sería tropical, pero éste está modificado por la orografía (p.e., los volcanes la Malinche, el Cofre de Perote y el Pico de Orizaba) y por la configuración de la cuenca, así como por la posición perpendicular de ésta con respecto a la trayectoria del flujo aéreo (Gasca, 1981).

La interacción de la latitud y la altitud de la Cuenca Oriental resulta en la presencia de los siguientes cinco tipos de clima de acuerdo con el sistema de clasificación de Köppen modificado por García (1988) para las condiciones de México: BS1 (seco estepario semiárido), C(W1) (templado subhúmedo con lluvias en verano), C(W2) (templado subhúmedo con lluvias en verano), ETH (frío) y EFH (muy frío).

El clima semiárido se distribuye en la parte central de la cuenca, la cual tiene una altitud entre 2 300 y 2 400 msnm, es decir, en la parte más baja de la misma. El clima (templado subhúmedo con lluvias en verano) rodea por completo al BS1 en forma concéntrica. Ambos climas son los predominantes en la cuenca, no obstante, el C(W1) se ubica entre 2 400 y 3 000 msnm en la parte norte y entre 2 300 y 2 500 msnm en las zonas este, oeste y sur. En el caso de la Cuenca Oriental, el clima C(W1) se presenta como una transición entre los climas BS1 y C(W2). El clima C(W2) se presenta en zonas más elevadas que los dos climas anteriores, a una altitud entre los 2 500 y los 3 700 msnm. El clima frío (ETH) se localiza en las cumbres de La Malinche y el Cofre de Perote, así como en el volcán Pico de Orizaba, a alturas de entre 3 700 y 4 400 msnm. Finalmente, el clima muy frío (EFH) se ubica sólo en la cumbre del Pico de Orizaba entre 4 400 y 5 600 msnm.

Geología (figura 3)

La Cuenca Oriental forma parte de la provincia Lagos y Volcanes del Anáhuac, que a su vez se encuentra incluida en el Eje Neovolcánico Transversal. Este último es una franja de rocas volcánicas de diversos tipos y texturas, emitidas sucesivamente por numerosos volcanes durante el Cenozoico; actualmente estas rocas constituyen un extenso bloque superpuesto a las rocas del Mesozoico que atraviesan la República Mexicana en dirección este-oeste (INEGI, 1990).

En la Cuenca Oriental destacan dos de los estrato-volcanes más altos del país, el Pico de Orizaba o Citlaltépetl y La Malinche y dos lagunas someras Tepyahualco y Totolcingo, producto del afloramiento del acuífero subterráneo y de las precipitaciones pluviales (Cruickshank, 1992). También se presentan como

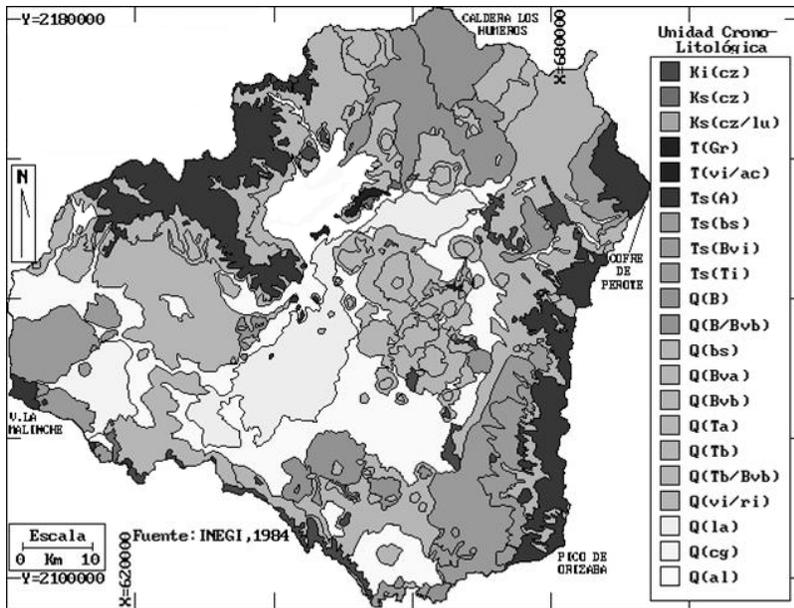


FIGURA 3. Unidades geológicas de la Cuenca Oriental.

un rasgo característico de la cuenca, seis conos de explosión freática o freato-magmática cuyo fondo está ocupado por agua, que reciben el nombre local de axalapascos; éstos son los lagos-cráter (maars) Alchichica, Quechulac, Atexcac, La Preciosa (Las Minas), Aljojuca y Tecuitlapa. La alimentación de estos lagos es similar a la de los lagos anteriores (Álvarez, 1950 y Cruickshank, 1992).

Estos elementos fisiográficos se encuentran inmersos en una amplia planicie que es el resultado del sepultamiento de pliegues en rocas marinas del Mesozoico por la acumulación de rocas volcánicas, derrames lávicos y una enorme cantidad de sedimentos pirocásticos (Gasca, 1981). De acuerdo con lo anterior y con base en la regionalización territorial de la cuenca, se presentan cinco geofomas dominantes: sierra, lomerío, llanura, bajada y valle.

Las secuencias expuestas en el área de la cuenca están formadas principalmente por rocas originadas durante el Cuaternario, seguido por las del Terciario y en menor proporción, las silíceas del Cuaternario que son dominantes.

En segundo lugar se encuentra material aluvial del Cuaternario originado por la acción fluvial y corresponde a suelos poco consolidados de arena gruesa ligeramente gravosa, compuestos por vidrio volcánico, feldspatos, micas y fragmentos de roca (SPP/INEGI, 1984a, b, c).

También están presentes las andesitas pertenecientes al Terciario Superior que se localizan en las zonas con mayor altitud (Gasca, 1981; Reyes, 1979 y SPP/

INEGI 1984a, b, c). En menor proporción se encuentran sedimentos lacustres formados principalmente por depósitos de limo, arenas y materia orgánica cubiertos por agua en la época lluviosa (suelo lacustre) (SPP/INEGI, 1984a, b, c). Por último, también se presentan en menor proporción basalto, toba básica y toba intermedia.

Vegetación terrestre (figura 4)

De acuerdo a la regionalización fitogeográfica de Rzedowski (1981), Oriental se ubica en dos provincias florísticas: Serranías Meridionales y Altiplanicie. A la provincia Serranías Meridionales pertenecen el Eje Neovolcánico, la Sierra Madre del Sur y el complejo montañoso del norte de Oaxaca. Incluye las elevaciones más altas de México (Pico de Orizaba y La Malinche, entre otras) y predominan los bosques de *Pinus* y *Quercus* que caracterizan algunas porciones de la Cuenca Oriental, particularmente las de mayor altitud. La provincia de la Altiplanicie corresponde a la región fisiográfica del mismo nombre que en México se extiende desde Chihuahua y Coahuila hasta Jalisco, Michoacán, el Estado de México, Tlaxcala y Puebla. La vegetación predominante consiste en matorrales xerófitos.

La Cuenca Oriental presenta elementos florísticos de ambas provincias, sin embargo, en la mayor parte de la cuenca (65%) la vegetación nativa ha sido sustituida por agricultura, tanto de temporal (61%) con cultivos anuales y permanentes como de riego (2%), así como por pastizal inducido para uso ganadero (5.5%). El principal cultivo es la alfalfa, aunque también se cultivan cebada, sorgo, haba, maíz, papa y trigo. Dentro de la agricultura de riego se cultiva cebada, avena, alfalfa, haba, cacahuate, frijol y maíz.

De la vegetación nativa aún existente, los principales tipos de vegetación que se encuentran son bosques de oyamel, de pino, de pino-encino y de encino-pino, matorral desértico rosetófilo con izotal, pastizal halófito y pradera de alta montaña. Los bosques mencionados ocupan un total de 14.5% del territorio total de la cuenca con 8.8% de pino, 1.9% de pino-encino y 1.4% de oyamel; el resto ocupa porcentajes menores.

El matorral desértico rosetófilo ocupa 7.5% del total de la cuenca, el pastizal halófito 6.2% y la pradera de alta montaña 0.4%.

Hidrología superficial (figura 5)

Oriental es una cuenca endorréica en la que los escurrimientos de agua captada por precipitación no fluyen al mar ni a otra cuenca, sino que por un lado se acumulan en el manto freático y por el otro se evaporan. Cuenta con una superficie aproximada de 4 982 km² (Alcocer *et al.*, 1998) y es reconocida por el INEGI (SPP/INEGI, 1984d, e, f) con el nombre de subcuenca de la laguna de Totolcingo, perteneciente a la cuenca del río Atoyac, dentro de la Región Hidrológica núm. 18 del río Balsas.

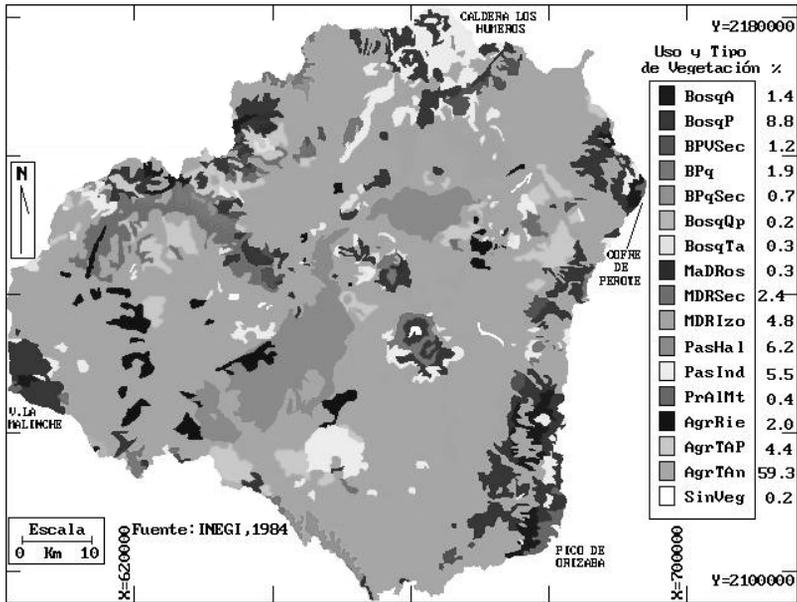


FIGURA 4. Vegetación y uso de suelo en la Cuenca Oriental.

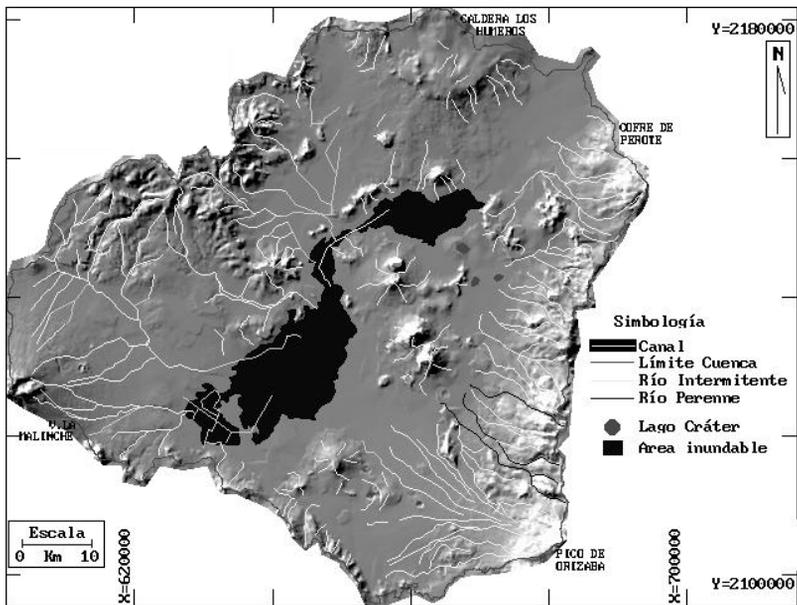


FIGURA 5. Hidrología superficial de la Cuenca Oriental.

El sistema hidrológico superficial es prácticamente inexistente debido a que la mayor parte de la superficie de la cuenca presenta depósitos piroclásticos de edad reciente que favorecen una alta infiltración. Por lo tanto y conjuntamente con el hecho de que la época de lluvias tiene una estacionalidad muy marcada y breve, en la cuenca no existen escurrimientos superficiales perennes (SPP/INEGI, 1984d, e, f).

Los escurrimientos de temporal en la cuenca son arroyos pequeños limitados a la ladera occidental de la sierra Cofre de Perote-Pico de Orizaba y a las laderas oriental y norte del volcán La Malinche. Los arroyos se asocian a abanicos aluviales en las laderas de estos volcanes. También existen otros arroyos de temporal en las laderas de los cerros Alto, San Gabriel y El Conejo, así como en las laderas del Cordón La Vigea Alta, en la parte norte de la cuenca.

Los arroyos de temporal más sobresalientes son La Caldera y Xonecuila, los cuales se originan en el parteaguas occidental de la cuenca, recibiendo el agua de los pequeños arroyos de las laderas de La Malinche. Los arroyos Quetzalapa y Piedra Grande que bajan por la ladera occidental de la sierra Cofre de Perote-Pico de Orizaba se pierden al llegar a la llanura de la cuenca debido a que su agua se infiltra hacia el subsuelo. Todos los demás escurrimientos de temporal desaparecen por la infiltración de sus aguas mucho antes de llegar a la parte más baja de la cuenca que corresponde a las lagunas de Totolcingo y Tepeyahualco (SPP/INEGI, 1984d, e, f).

Existen manantiales en las partes altas de los tres volcanes y en el cerro San Gabriel, así como en El Carmen, en las cercanías de la estación Los Manantiales y cerca de Ciudad Serdán. Asimismo se presenta un manantial de aguas termales (92°C) ubicado en Libres (Maderey, 1967).

En la parte central de la cuenca, que corresponde a la altitud más baja, se forman dos lagunas someras otrora perennes, luego de temporal, la laguna de Totolcingo (El Carmen) y la laguna de Tepeyahualco (El Seco). Ambas lagunas cubren una superficie aproximada de 290 km². Existen dos hipótesis acerca del origen de las lagunas. Knoblich (1978) opina que el fondo de las lagunas se encuentra por debajo del nivel medio del manto freático, por lo tanto su profundidad varía de acuerdo a la fluctuación del nivel de las aguas subterráneas. Reyes (1979) y Gasca (1981), por otro lado, explican que las lagunas se forman por la acumulación del agua pluvial debido a la presencia de una capa arcillosa impermeable. Sin embargo, Cruickshank (1992) indica que se forman principalmente como resultado del afloramiento del agua subterránea en la época de lluvias del año. Actualmente dichas lagunas no se forman cada año y se han convertido en cuerpos acuáticos de llenado episódico (Alcoeger *et al.*, 1997 y 1998).

Adicionalmente, en Oriental se encuentran seis lagos-cráter cuya principal fuente de agua es aportada por el manto freático de la misma. Tales lagos son Alchichica, La Preciosa (Las Minas), Quechulac, Atexcac, Aljojuca y Tecuitlapa.

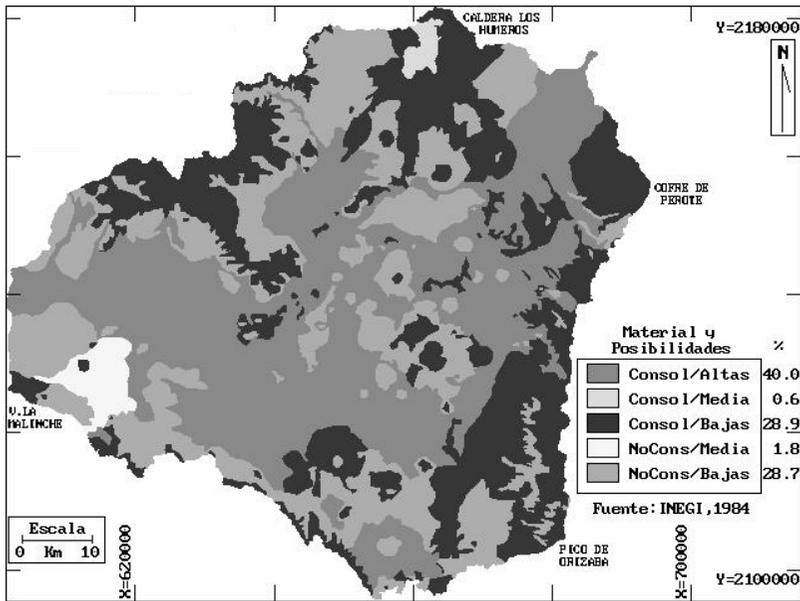


FIGURA 6. Unidades hidrogeológicas de la Cuenca Oriental.

En conjunto cubren un área de 4.13 km². Las características del agua de estos lagos evidencian el origen subterráneo de ésta, ya que por su interrelación con las rocas y sedimentos subterráneos, el agua presenta diversos grados de salinidad y composición química (Vilaclara *et al.*, 1993) que varían de un lago a otro (Gasca, 1981).

Hidrología subterránea (figura 6)

El sistema hidrológico subterráneo de la cuenca está mejor desarrollado que el superficial. Como se mencionó anteriormente, la mayor parte de los escurrimientos pluviales se infiltran hacia el subsuelo, formándose un manto acuífero extenso, el cual constituye un recurso de abastecimiento hídrico muy valioso.

La relevancia de la Cuenca Oriental como un área almacenadora de agua subterránea estriba en el hecho de que 40% de ésta presenta materiales consolidados de alta permeabilidad con posibilidades altas de presencia de recurso hídrico subterráneo. Dichos materiales se encuentran en toda el área baja de la cuenca.

No obstante, los materiales consolidados y los no consolidados con conductividades hidráulicas bajas también son abundantes y están localizados en las partes altas y laderas bajas de la cuenca. La presencia de materiales no consolidados (zona de San Juan Ixtenco) y consolidados con conductividades hidráulicas medias (zona de Los Humeros) es escasa.

En la Cuenca Oriental el manto acuífero se encuentra a una profundidad de menos de un metro bajo la superficie en las porciones más bajas. Dentro de la microcuenca de Alchichica el nivel del lago ha descendido más de un metro. Sin embargo, la falta de sistema de monitoreo hidrogeológico de largo tiempo, no permite evaluar el origen del descenso del nivel en el lago, ni en el acuífero regional. Dos hipótesis que se han manejado para tratar de explicar estos descensos son la sobrexplotación del acuífero o un efecto del cambio climático. La regeneración de éste es resultado de la precipitación pluvial y por una fuerte afluencia de los cerros adyacentes, especialmente de la región de La Malinche. Las aguas procedentes de los escurrimientos temporales en el periodo de lluvias, se infiltran hacia el subsuelo en las partes bajas de las laderas de los cerros, regenerando el manto subterráneo (Cruickshank, 1992). Debido a la cantidad de agua contenida en dicho manto y a su escasa profundidad, el agua subterránea aflora hacia la superficie formando las lagunas de Totolcingo (El Carmen) y Tepyahualco (El Salado) y los lagos-cráter Alchichica, Atexcac, Quechulac, La Preciosa, Aljojuca y Tecuitlapa (Cruickshank, 1992 y Gasca, 1981). El equilibrio de las aguas subterráneas está establecido por la evaporación que se lleva a cabo en dichos cuerpos de agua (Knoblich, 1971, 1973, 1978), sin embargo su volumen ha disminuido en los últimos años, poniendo en riesgo su permanencia (Alcocer y Escobar, 1990 y Alcocer *et al.*, 1998).

Las aguas subterráneas de la cuenca tienen un tiempo de residencia largo lo cual ha dado como resultado una amplia disolución de las rocas por el agua subterránea. Por ejemplo, la disolución de las calizas, ha originado que se encuentren altas concentraciones de calcio en el agua subterránea de esta área. En consecuencia, aunque es posible extraer grandes cantidades de agua subterránea, ésta solo es parcialmente apta como agua potable, industrial o de riego, debido a su salinidad (Knoblich, 1971, 1973, 1978). En la zona que se encuentra entre La Malinche y Huilapitzo, el agua subterránea presenta una mejor calidad, sin embargo, en esta parte el manto acuífero es mucho más profundo lo cual incrementa los costos de extracción (Knoblich, 1971, 1973, 1978). A pesar de lo anterior, en la actualidad este recurso subterráneo es considerado por la CNA como una fuente potencial de abastecimiento —7 m³/s— para la Ciudad de México (SOSP-DDF, 1982 y NRC *et al.*, 1995). Esta opción ha recibido mucha oposición por parte de los habitantes de la cuenca, por lo cual, se ve poco probable. Asimismo, la Ciudad de Puebla, ha expresado interés en importar el agua de esta cuenca. En el ámbito mundial, se está enfatizando el uso sustentable por cuenca, y tratando de reducir la exportación del agua de una cuenca a otra, debido a los problemas ecológicos y sociales relacionados con la exportación de agua de una cuenca a otra.

Dentro de la cuenca existen un gran número de pozos; la carta de aguas subterráneas (SPP/INEGI, 1984g, h, i) registraba para la fecha, aproximadamente

noventa. Sin embargo, los pobladores indican que a menudo se abren nuevos pozos para riego, por lo que resulta evidente que el número de éstos en la actualidad es mucho mayor. Los pozos se concentran principalmente en cuatro sitios, uno hacia el este entre los lagos Alchichica, La Preciosa y Quechulac, otro al oeste cerca de la población Francisco Villa, uno más entre Lomas de Jonguito y Cuapiaxtla y por último, al norte de San Salvador El Seco (SPP/INEGI, 1984g, h, i).

Cabe destacar la presencia de varios géiseres en Los Humeros, al norte de la cuenca, los cuales han sido aprovechados por la Comisión Federal de Electricidad para el establecimiento de una planta geotérmica generadora de energía eléctrica (Yáñez, 1990).

De acuerdo con el Decreto publicado el 19 de agosto de 1954 (SPP, 1983), prácticamente toda la cuenca está clasificada como área de veda para la explotación del agua subterránea. Sin embargo, la Cuenca Oriental queda comprendida en la Fracción III, la cual indica que “la veda se ha establecido con el fin de proteger los mantos acuíferos explotados con diversos fines, de los que, aún en el caso de que estén abatidos, es necesario extraer el agua para cubrir las necesidades de la región de que se trate...” (Maderey, 1967).

DIAGNÓSTICO DE LOS IMPACTOS HUMANOS

Para analizar en forma más armónica la situación de la Cuenca Oriental con relación a sus recursos hídricos, se han reunido bajo cinco grandes rubros los efectos que las actividades humanas han generado en el área de estudio.

Actividades en la cuenca de captación/drenaje

Dos actividades son responsables prioritariamente de modificar drásticamente la cuenca: el pastoreo de mamíferos silvestres y domesticados, así como la modificación de la vegetación natural llevada a cabo por el hombre. Los efectos del pastoreo y especialmente el sobrepastoreo se han traducido en cambios en los patrones de drenaje y en un incremento en las cargas de sedimentos de la escorrentía. Los cambios físicos más importantes en la cuenca son la formación de veredas por los animales así como la ruptura de las costras superficiales protectoras; ambos eventos guían a la movilización de partículas superficiales del suelo y por ende a la erosión.

Los cambios en la naturaleza de la vegetación de la cuenca es igualmente o más importante que el sobrepastoreo. Geréz (1983) explica que hace 500 años, 60% de Oriental se encontraba forestada (e.g., *Pinus cembroides*, *Juniperus deppeana*, *Quercus* spp.) y el restante 40%, a excepción de las zonas inundadas del centro de la cuenca, eran pastizales (e.g., *Distichlis spicata*, *Suaeda* spp.). Sin embargo,

65% de la vegetación nativa de la cuenca ha sido remplazada por especies cultivables y pastos introducidos.

La remoción de la vegetación natural de enraizamiento profundo (árboles)—deforestación— y su substitución por pastos y especies de cultivo de enraizado superficial han dado por resultado un cambio en la hidrología local. Estas modificaciones han repercutido, seguramente, en la salinidad, composición y estacionalidad de la escorrentía. Por lo tanto, el agua subterránea subyacente, en la mayor parte del subsuelo de la cuenca salina, se acerca a una distancia tal (p.e., hasta de un metro en las porciones más bajas de la cuenca) que por capilaridad simple alcanza la superficie. La evaporación actúa e incrementa la salinidad del suelo; el agua que lava estos suelos va a parar a los cuerpos receptores finales (lagos terminales). El resultado obvio es un incremento en la salinidad de éstos (p.e. Totolcingo).

El sobrepastoreo, la remoción de la vegetación y la salinización han guiado a una erosión severa y a la desertización (degradación de suelos) de gran parte de la cuenca.

Información no publicada por Alcocer *et al.* muestra una fuerte asociación entre la pendiente del terreno y el grado de erosión presente. La erosión alta y muy alta es común en las elevaciones con una pendiente mayor a 30%; ésta se ubica principalmente en las estribaciones de los cerros así como en las zonas de barrancas. La situación es especialmente crítica en las zonas deforestadas del Cofre de Perote así como del Pico de Orizaba. En las estribaciones de algunos cerros y en las zonas de malpaís, con pendientes mayores a 10% y menores de 30%, se encuentra erosión moderada. Finalmente, la erosión ligera se presenta en las llanuras, valles y planicies con una pendiente de 0 a 8%. La baja pendiente y las características edáficas le confieren al suelo una menor vulnerabilidad a la erosión.

Desvío de afluentes

Existían numerosos arroyos y manantiales (Knoblich, 1973) en la cuenca que, a pesar de su temporalidad, proporcionaban una fuente de agua dulce a los habitantes de la cuenca. Con el incremento en el uso de éstos (agua potable, riego, etc.), especialmente siguiendo al crecimiento poblacional de la zona, se han generado una serie de efectos derivados. El desvío de los afluentes ha guiado a una disminución o desaparición total de cuerpos acuáticos superficiales (Reyes, 1979), como es el caso de Tepeyahualco que está seco desde hace varios años y de Totolcingo que ha pasado de ser un lago perenne a uno temporal y, finalmente, episódico (Alcocer *et al.*, 1997). El efecto principal del desvío de los afluentes ha sido doble: un decremento en el volumen y un incremento en la salinidad.

La disminución en el volumen es acompañada por un decremento en el área lacustre, especialmente en los lagos someros (Totolcingo y Tepeyahualco), lo cual ha expuesto áreas amplias del lecho lacustre. Este hecho permite que sales y se-

dimentos sean transferidas a otras partes de la cuenca vía eólica (tolvaneras). Asimismo, la disminución en el nivel de los lagos-cráter, ha eliminado las áreas litorales someras que proveían de refugio a la biota (p.e., aves acuáticas residentes y migratorias, larvas y juveniles de peces), lo cual ha tenido un impacto importante en la conservación biológica y en la economía regional. Vale la pena hacer hincapié en dos ejemplos de lagos, uno profundo (Alchichica) y uno somero (Tecuitlapa).

En Alchichica, los depósitos de tufa previamente sumergidos, han quedado expuestos lo cual destruye una gran variedad de microhábitats disminuyendo la biodiversidad del lago (Escobar y Alcocer, 2002). La situación es trágica si se considera que en menos de dos años la disminución de nivel del lago se ha acelerado alcanzando casi medio metro.

Al descender el nivel del agua de Tecuitlapa se dividió el lago en tres porciones: el cuerpo principal en forma de media luna, un lago con amplias fluctuaciones de nivel, Tecuitlapa Norte (Alcocer *et al.*, 1999) y un pequeño lago temporal, Tecuitlapa Sur (Alcocer *et al.*, 2001). Desde hace algunos años, Tecuitlapa Norte y Tecuitlapa Sur se secaron y la profundidad de Tecuitlapa disminuyó. En fechas recientes, (febrero 2004), Tecuitlapa se redujo aún más y se dividió en dos porciones por lo cual su persistencia a futuro es incierta.

Un incremento en la salinidad de los lagos se traduce en cambios químicos, físicos y biológicos. El incremento en la salinidad excede la capacidad de solubilidad de algunas sales las cuales precipitan, alterando la composición iónica de la solución remanente. La principal sal depositada en los lagos es el sesquicarbonato de sodio (tequesquite) muy común en los márgenes de Totolcingo y los dos pequeños cuerpos acuáticos de Tecuitlapa. El incremento en salinidad disminuye la capacidad de solubilidad del oxígeno. Sin embargo, los cambios más evidentes con el aumento de la salinidad se expresan en la biota. Un ejemplo muy claro lo constituye la abundante presencia de la cianobacteria *Spirulina maxima* y las larvas de los insectos *Ephydra hians* y *Culicoides occidentalis* exclusivamente en los lagos que han alcanzado una elevada concentración de sales (e.g., Totolcingo).

Contaminación

De todos los cuerpos acuáticos que se encuentran en la Cuenca Oriental, los más sensibles a la contaminación son los terminales, o sean aquellos que se encuentran en las partes más bajas de la misma. Más aún, la ausencia de efluentes de los lagos permite que los contaminantes se vayan concentrando.

Afortunadamente, al momento parece ser que la contaminación de los recursos hídricos de la cuenca es moderada. Sin embargo, hace falta realizar una investigación específica para reconocer si existe o no la presencia de contaminantes en los ríos, lagos o agua subterránea de la cuenca. Los residuos sólidos son claramente visibles en los lagos; latas, bolsas, envases, y en general, toda una serie de dese-

chos. Adicionalmente, jabones, detergentes y blanqueadores se emplean comúnmente para la higiene personal y lavado de ropa, mismos que son desechados a lo largo de la zona litoral de los lagos-cráter y las principales corrientes.

Debido a que la agricultura es una actividad preponderante y creciente en la zona, es de esperarse que tarde o temprano los recursos hídricos sean impactados con fertilizantes y plaguicidas. Este punto es especialmente importante en relación con las aguas subterráneas ya que son empleadas para riego y consideradas como fuente potencial de abastecimiento de agua potable para grandes ciudades como Puebla y México.

Impactos directos en los recursos bióticos de relevancia económica local

El impacto más directo sobre la biota acuática lo constituye la disminución del recurso hídrico. Sin embargo, otros procesos como la introducción de especies exóticas puede dar por resultado la eliminación de especies nativas de importancia económica o ecológica. En los lagos-cráter, se han introducido carpas japonesas *Cyprinus carpio* y *Carassius auratus* en Aljojuca y Tecuitlapa. Asimismo, en Quechulac y La Preciosa se desarrollan cultivos de trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) por parte de los habitantes de la zona. Sin embargo, algunas de ellas han escapado y establecido en los lagos. Al momento no existen estudios del impacto de estas especies exóticas introducidas sobre las poblaciones locales de charales, sin embargo al ser carnívoras, éstas depredarán juveniles y adultos de charales. Resulta necesario recordar que los charales de los lagos-cráter (*Poblana alchichica*, *P. letholepis*, *P. squamata*) son endémicos de cada uno de ellos y que, por lo tanto, su existencia está puesta en riesgo no sólo por la disminución del nivel de los lagos y la contaminación, sino ahora por la presencia de especies depredadoras más grandes y voraces.

Aparte de las introducciones, son pocos los casos de impactos directos en otros organismos. Sin embargo resulta importante mencionar que las aves acuáticas han disminuido notablemente debido a la reducción o eliminación de la zona litoral de los lagos (menor disponibilidad de zonas de alimentación, refugio, reproducción, etc.), así como al incremento de la caza no controlada llevada a cabo por locales y foráneos. Aunque con objetivos científicos, la especie endémica de salamandra ambistomátida (ajolote) de Alchichica, *Ambystoma taylorii*, es frecuentemente substraída del lago.

Impactos físicos en la cuenca lacustre

El impacto físico más importante en la cuenca es la sobreextracción de agua subterránea para la irrigación y suministro de agua para grandes ciudades. Como se ha mencionado, la agricultura es una actividad importante y creciente en la cuenca. Originalmente la agricultura dependía de la precipitación pluvial solamente. Hoy en día, la irrigación con aguas subterráneas está desplazando a la

de temporal. Sin embargo, el riego por aspersión en un clima seco, como es la parte central de la cuenca, se traduce en una pérdida del recurso antes de alcanzar el suelo y una concentración de las sales disueltas que terminan por salinizar el terreno.

Oriental está situada casi 100 metros por encima de la Ciudad de México, de forma tal que sus “bastos” recursos de agua subterránea han sido considerados para ser transportados por gravedad para cubrir los requerimientos de grandes ciudades (e.g., la Ciudad de México, SOSP-DDF, 1982; NRC *et al.*, 1995). En 1978, Knoblich estimó que una extracción de 2000 L/s causaría que Totolcingo se secase y que Tepeyahualco así como que en los lagos cráter disminuyera su nivel en un metro. En la actualidad las predicciones de Knoblich se han cumplido con creces de forma tal que Tepeyahualco y Totolcingo se encuentran secos y el nivel de los lagos cráter ha disminuido en más del metro predicho, lo cual pone en serio riesgo la persistencia de estos ecosistemas (Alcocer y Escobar, 1990; Alcocer y Williams, 1993 y Alcocer *et al.*, 1998).

Los sedimentos de los lagos salinos contienen minerales de valor comercial, bicarbonato y cloruro de sodio, en este caso. La extracción de éstas frecuentemente daña físicamente la estructura natural de las cuencas lacustres e indirectamente, modifica la química lacustre y consecuentemente la biota. La construcción de diques para favorecer la extracción de tequesquite o para crear tierras para cultivo guía a la desecación de grandes extensiones de terreno, tal es el caso de Totolcingo y Tepeyahualco (Ewald *et al.*, 1994).

Asimismo, al ser sobre-explotados los ricos recursos hídricos de la cuenca ya sea para agua potable, riego o para la obtención de sales, llevará como consecuencia un asentamiento general de la zona con el consecuente fracturamiento del suelo. Este mismo fenómeno (i.e. subsidencia del terreno por sobreextracción de agua subterránea) sucedió en el área del lago de Texcoco, al oriente de la Ciudad de México (Alcocer y Williams, 1996). Adicionalmente, la construcción de dos carreteras (Zacatepec-El Carmen y Zacatepec-Oriental) y una vía de tren fragmentó Totolcingo en cuatro porciones.

Finalmente, zonas naturales de recarga (e.g., Las Derrumbadas) están siendo destruidas y transportadas como material para construcción en forma de grava y arena. El número de empresas dedicadas a la extracción de este material ha aumentado considerablemente en los últimos años.

CONCLUSIONES

La mayoría de los mexicanos viven en las regiones áridas y semiáridas que representan dos tercios del territorio nacional en donde el agua es escasa. Causas naturales y humanas favorecen la degradación de los recursos epicontinentales

mexicanos. Por lo anterior existe una clara necesidad de desarrollar e implementar programas de uso sustentable del agua a nivel cuenca. Sin embargo, la tasa de degradación acelerada de los recursos epicontinentales mexicanos hace pensar que no habrá suficiente tiempo para llevar a cabo las evaluaciones integrales de las cuencas para contar con las herramientas necesarias para la implementación de los programas de uso sustentable de agua antes de que los lagos se hayan secado. El caso de la Cuenca Oriental claramente ilustra la tendencia de desecación que siguen los recursos acuáticos epicontinentales mexicanos. La deforestación, el sobrepastoreo, la sobreexplotación de los acuíferos y la salinización de los suelos derivada de malas prácticas de riego, han inducido procesos de erosión severa y desertización generalizada en la cuenca. De esta forma, las actividades humanas pueden estar provocando las siguientes consecuencias negativas: clima local más caliente y seco, escasez de agua, tormentas de polvo, salinización, todas ellas derivando en la disminución de la sustentabilidad de la cuenca incluyendo actividades productivas (forestería, agricultura, ganadería). Los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la cuenca se encuentran amenazados seriamente. A pesar de que la cuenca está clasificada como área de veda para extracción de agua subterránea desde 1954 y categorizada como Área Hidrológica Prioritaria por la Conabio desde 1998 (Arriaga Cabrera *et al.*, 2000), no se ha establecido programa alguno de uso sustentable del agua para esta importante cuenca.

REFERENCIAS

- Alcocer, J. y E. Escobar, 1990, "The drying up of the Mexican Plateau Axalapazcos", *Salinet*, 4, pp. 34-36.
- Alcocer, J. y W.D. Williams, 1993, "Lagos salinos mexicanos", en Salazar-Vallejo, S.I. y N.E. González (eds.), *Biodiversidad marina y costera de México*, Conabio y Ciqro, México, pp. 849-865.
- Alcocer, J. y W.D. Williams, 1996, "Historical and recent changes in Lake Texcoco, a saline lake in Mexico", *International Journal of Salt Lake Research*, 5 (1), pp. 45-61.
- Alcocer, J., A. Lugo, E. Escobar y M. Sánchez, 1997, "The macrobenthic fauna of a former perennial and now episodically filled Mexican saline lake", *International Journal of Salt Lake Research*, 5 (3), pp. 261-274.
- Alcocer, J., A. Lugo, M.R. Sánchez, M. Chávez y E. Escobar, 1998, "Threats to the saline lakes of the Oriental basin, Mexico, by human activities", *Verh. Int. Verein. Limnol.*, 26, pp. 1383-1386.
- Alcocer, J., E. Escobar, A. Lugo y L.A. Oseguera, 1999, "Benthos of a perennially astatic, saline, soda lake in Mexico", *International Journal of Salt Lake Research*, 8 (2), pp. 113-126.

- Alcocer, J., E. Escobar, A. Lugo, L.M. Lozano y L.A. Oseguera, 2001, "Benthos of a seasonally-astatic, saline, soda lake in Mexico", *Hydrobiologia*, 466, pp. 291-297.
- Álvarez, J., 1950, "Contribución al conocimiento de los peces de la región de Los Llanos, estado de Puebla (México)", *An. Esc. Nac. Cienc. Biol., Méx.* 6 (1-4), pp. 81-107.
- Arriaga Cabrera, L., V. Aguilar Sierra y J. Alcocer Durand, 2000, *Aguas continentales y diversidad biológica de México*, CONABIO, México, 327 pp. + 1 mapa.
- Barradas, V.L., 1983, "Capacidad de captación de agua a partir de la niebla en *Pinus montezumae*, Lambert, de la región de las grandes montañas del Edo. de Veracruz", *Biótica*, 8 (4), pp. 427-431.
- Cruickshank, V.L.C., 1992, "Relación entre las aguas superficiales y subterráneas en una cuenca", *Ingeniería Hidráulica en México*, 7, pp. 53-63.
- Escobar, E. y J. Alcocer, 2002, "*Caecidotea williamsi* (Crustacea: Isopoda: Asellidae), a new species of isopod from a saline crater-lake in the Central Mexican Plateau", *Hydrobiologia*, 477, pp. 93-105.
- Ewald, U., E. Seele y J. Alcocer, 1994, "Tequezquite. A story with loose ends. (The occurrence of natural soda in Mexico)", *Journal of Salt-History*, 2, pp. 71-100.
- Gasca, A., 1981, *Algunas notas de la génesis de los lagos-cráter de la cuenca de Oriental. Puebla-Tlaxcala-Veracruz*, Departamento de Prehistoria, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Colección Científica Prehistoria 98, México, 55 p.
- Geréz, P., 1983, "Crónica del uso de los recursos naturales en la cuenca de Perote-Libres", en Goldberg, A.D. (comp.), *El Cofre de Perote. Investigaciones ecológicas en un área conflictiva*, INIREB, Xalapa, pp. 11-16.
- Golberg, A.D. y H. García, 1983, "Las cortinas rompevientos: posibilidades de utilización en el Valle de Perote", en Golberg, A.D. (comp.), *El Cofre de Perote. Investigaciones ecológicas en un área conflictiva*, INIREB, Cuadernos de Divulgación, núm. 9, Xalapa, pp. 63-67.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1990, *Geología de la República Mexicana*, INEGI, México, 88 p.
- Knoblich, K., 1971, "Posibilidades de poner en explotación aguas subterráneas en la cuenca de Puebla-Tlaxcala", *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala*, 9, pp. 7-10.
- Knoblich, K., 1973, "Las condiciones de las aguas subterráneas en la cuenca de El Seco-Oriental (Puebla-Tlaxcala/México)", *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala*, 9, pp. 1-4.
- Knoblich, K., 1978, "La cuenca de El Seco/Oriental. Una reserva de agua subterránea natural para el futuro", *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala*, 15, pp. 231-234.
- Koterba, M. y S. Oliveri B., 1983, "Manejo actual de los recursos naturales en el Valle de Perote", en Golberg, A.D. (comp.), *El Cofre de Perote. Investigaciones*

- ecológicas en un área conflictiva*, INIREB, Cuadernos de Divulgación, núm. 9, Xalapa, pp. 33-41.
- Maderey, L.E., 1967, *Estudio preliminar sobre las aguas subterráneas en México*, Instituto de Geografía, UNAM, México, 75 p.
- Medillín-Leal, F., 1978, "La desertificación, problema de alcance mundial", en F. Medillín-Leal (ed.), *La desertificación en México*, Instituto de Investigaciones de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, SLP, México, pp. 27-32.
- NRC, AIC y ANI (National Research Council, Academia de la Investigación Científica, A.C. y Academia Nacional de Ingeniería, A.C.), 1995, *El suministro de agua de la Ciudad de México. Mejorando la sustentabilidad*, National Academy Press, Washington, 114 p.
- Ramírez, F., 1983, "Situación del Parque Nacional Cofre de Perote, Ver. y su importancia como alternativa de uso de suelo", en Goldberg, A.D. (comp.), *El Cofre de Perote. Investigaciones ecológicas en un área conflictiva*, INIREB, Cuadernos de Divulgación 9, Xalapa, pp. 51-56.
- Reyes, M., 1979, *Geología de la cuenca de Oriental. Estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala*, Departamento de Prehistoria, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Colección Científica Prehistoria 71, México, 62 p.
- Rzedowski, J., 1981, *La vegetación de México*, Limusa, México, 432 p.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), 1987, *Sistema Cutzamala*, Comisión de Aguas del Valle de México, SARH, México, 47 p.
- Sedesol (Secretaría de Desarrollo Social), 1993, *México. Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente 1991-1992*, Instituto Nacional de Ecología, Sedesol, México, 379 p.
- SOSP (Secretaría de Obras y Servicios Públicos), 1982, *Sistema hidráulico del Distrito Federal*, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría de Obras y Servicios del DDF, México, s/p.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984^a, *Carta Geológica, Ciudad de México*, E14-2, esc. 1: 250 000.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984b, *Carta Geológica, Veracruz*, E14-3, esc. 1: 250 000.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984c, *Carta Geológica, Orizaba*, E14-6, esc. 1: 250 000.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984d, *Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, Ciudad de México*, E14-2, esc. 1: 250 000.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984e, *Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, Veracruz*, E14-3, esc. 1: 250 000.

- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984f, *Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, Orizaba*, E14-6, esc. 1: 250 000.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984g, *Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas, Ciudad de México*, E14-2, esc. 1: 250 000.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984h, *Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas, Veracruz*, E14-3, esc. 1: 250 000.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984i, *Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas, Orizaba*, E14-6, esc. 1: 250 000.
- Soria, J., 1987, *Control de la contaminación ambiental producida por centrales termoeléctricas*, Tercer Encuentro Iberoamericano sobre la Ciudad, Jornadas Técnicas sobre el Medio Ambiente, Tecniberia, México, 85 p.
- Toledo, V.M., J. Carabias, C. Toledo y C. González-Pacheco, 1989, *La producción rural en México: alternativas ecológicas*, Prensa de Ciencias, UNAM y Fundación Universo Veintiuno, Colección Medio Ambiente 6, 402 p.
- Vázquez-Yañez C. y A. Orozco, 1989, *La destrucción de la naturaleza*. La Ciencia desde México núm. 83, Secretaría de Educación Pública y Fondo de Cultura Económica, México, 102 p.
- Vilaclara, G., M. Chávez, A. Lugo, H. González y M. Gaytán, 1993, "Comparative description of crater-lakes basic chemistry in Puebla State, Mexico", *Verh. Internat. Verein. Limnol*, 25, pp. 435-440.
- Yañez, C., 1990, *Exploración geotérmica de Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz*, Comisión Federal de Electricidad, Área de Geología y Minería, México.

PROBLEMÁTICA DEL AGUA DE LA CUENCA ORIENTAL, ESTADOS DE PUEBLA, VERACRUZ Y TLAXCALA*

Javier Alcocer D., Óscar A. Escolero F. y Luis E. Marín S.

La zona tropical-subtropical del centro de México tiene condiciones climáticas que han propiciado un elevado desarrollo poblacional, que desarrollo ha desencadenado en algunas zonas procesos de alteración ambiental acelerados que requieren una evaluación profunda que genere medidas de control efectivas. La Cuenca Oriental es un ejemplo interesante de la respuesta que tiene una zona tropical-subtropical a presiones de sobreexplotación y cambio de uso de suelo.

La cuenca presenta características climáticas que la hacen altamente susceptible a la desertificación (Geréz, 1983; Golberg y García 1983; Koterba y Oliveri, 1983 y Ramírez, 1983). En los ecosistemas desertificados existe empobrecimiento, esterilidad, disminución parcial o total del potencial biológico (productividad animal y vegetal) y son incapaces de sustentar cualquier forma de vida cuando el proceso alcanza sus últimas consecuencias (Medellín-Leal, 1978).

En esta área existe una marcada escasez de agua superficial debido, por un lado, a las condiciones climáticas semiáridas de la zona, y por otro, a que la mayor parte de la superficie se encuentra formada por material de tipo cinerítico de edad reciente en el que la mayoría del agua de lluvia se infiltra debido a su carácter altamente permeable (Gasca, 1981).

La deforestación provoca, sin duda, el efecto ambiental más notable sobre el ciclo hidrológico. La vegetación cumple un importante papel en el movimiento natural del agua dado que, entre otras, realiza las funciones de intercepción del agua de lluvia, captación de la niebla, conducción de agua hacia el suelo, y regulación de la velocidad de escurrimiento. La denudación de un área tiene, por lo tanto, severos efectos sobre una porción importante del ciclo hidrológico dado que aumenta la velocidad de escurrimiento y disminuye la cantidad de agua que se infiltra. Esto a su vez produce cambios en la recarga de los acuíferos (manan-

*Los autores agradecen al Conacyt el apoyo recibido por medio del proyecto 41667.

tiales), aparición de inundaciones catastróficas, reducción de la humedad de las laderas (lo cual facilita la aparición de incendios forestales), cambios en la dinámica geomorfológica y, por supuesto, erosión (Toledo *et al.*, 1989).

En la cuenca se practica la tala y aclareo del bosque, sobrepastoreo y sobrexplotación agrícola del suelo, lo que aunado a las lluvias torrenciales que en ocasiones ocurren en el área, contribuye a acelerar los procesos erosivos (Koterba y Oliveri, 1983). Un suelo erosionado presenta una capacidad limitada para la captación de agua pluvial y, por consiguiente para la recarga de los acuíferos, en razón de la falta de vegetación y suelo.

Otros fenómenos que se ven afectados con la remoción de la vegetación son los de interceptación y captación de la niebla y su precipitación. Por ejemplo, Barradas (1983) registró que un solo individuo de una especie de pino en el Cofre de Perote, es capaz de precipitar hasta 57.9 litros de agua por hora a partir de la niebla. El acarreo desproporcionado de materiales provoca el azolve de los lagos y la pérdida de los nutrientes de los suelos. La deforestación seguramente afecta, de alguna forma, fenómenos mesoclimáticos y sobre todo microclimáticos. Ello posiblemente altere los grados de pluviosidad y de sequía en algunas zonas o regiones.

No obstante el balance positivo del agua subterránea en el ámbito nacional, regionalmente el déficit es considerable y se cubre sobrexplotando los acuíferos. Por ejemplo, en el año 2000, la Comisión Nacional del Agua reporta más de 100 acuíferos sobrexplotados. Aunque en 1981 la Cuenca Oriental no figuraba aún entre los acuíferos mexicanos sobrexplotados (Sedesol, 1993), seguramente éste lo está, como se ha reflejado en el descenso drástico del nivel de los recursos acuáticos superficiales (Alcocer y Escobar 1990; Alcocer *et al.*, 1998). En relación con lo anterior, en la Cuenca Oriental se pone en riesgo la existencia de la biota acuática en general (incluyendo la endémica) y la sustentabilidad de las actividades agrícolas presentes. Además, existen planes de abastecer a la Ciudad de México con 7 m³/s de agua procedentes del acuífero de la cuenca (SARH, 1987; NRC *et al.*, 1995), lo cual podría aumentar gravemente el problema.

Con respecto a la vegetación nativa del lugar, puede mencionarse que a la fecha se encuentra muy deteriorada, ya que desde hace aproximadamente 500 años, el uso del suelo ha venido cambiando, sustituyéndose la vegetación natural por tierras de cultivo y por zonas erosionadas (Geréz, 1983). Geréz (*op. cit.*) considera que hace aproximadamente 500 años, 60% de la superficie de la cuenca estuvo cubierta por bosques y 40% con pastizales naturales. En 1983 55% del área era utilizada agrícolamente, 21% estaba cubierta por bosques (bosque de pino, pino encino, y de *Abies religiosa*) y 15% presentaba izotal de yuca (*Yuca* sp. y *Nolina* sp.) y matorrales de lechuguilla (*Agave lechuguilla*), magueyes (*Agave* spp.) y nopales (*Opuntia* spp.). En la actualidad el área dedicada a la agricultura se ha expandido en detrimento de los otros tipos de áreas vegetadas.

Los cambios en la vegetación natural también han influido en la fauna ya que, por ejemplo, Torquemada en 1615 (*cit. en Geréz, op. cit.*) menciona que en la planicie de la cuenca pacían manadas de berrendos (*Antilocapra americana*), especie que ahora sólo se encuentra en algunas regiones del norte de México.

Como puede verse, es de suma importancia llevar a cabo acciones que permitan frenar el deterioro y conservar los valiosos recursos naturales de la zona, para lo cual, se considera pertinente llevar a cabo un diagnóstico integral y actual de los mismos, ya que éste es la base de la que se debe partir para elaborar una propuesta adecuada del manejo de la cuenca. Lo anterior es presentado a continuación como un estudio de caso.

Los acuíferos sobreexplotados requieren una reglamentación de extracciones, para moderar la explotación de las aguas del subsuelo y reestablecer el equilibrio. La mayor parte de explotación tiene lugar —prioritaria aunque no exclusivamente— en las porciones áridas y semiáridas del país como la que se trata en este capítulo, donde la recarga es pobre y el balance hidráulico negativo; por consiguiente se está minando el almacenamiento subterráneo.

REGIONALIZACIÓN Y ANTECEDENTES

La Cuenca Oriental (18°57'-19°44' N, 97°10'-98°05' W) se localiza, por sus características fisiográficas, en la Provincia Ecológica 57 denominada Lagos y Volcanes del Anáhuac (figura 1). De acuerdo a las agrupaciones de topoformas la zona se divide en trece sistemas terrestres o ecogeográficos (figura 2, tabla 1) denominados en lo subsecuente “Unidades Ambientales Físicas” (UAF).

Superficie, altitud y pendiente

La superficie total de la Cuenca Oriental es de 4 981 747 km². En orden decreciente de superficie, el ordenamiento de las UAF es el siguiente. 5704/ Perote-Tepeaca-Molcaxac (20.2%), 5742/Ciudad Serdán (16.6%), 5741/Teziutlán-Xiutetelco (11.0%), 5702/Tlaxco (10.3%), 5740/Cofre de Perote-Pico de Orizaba (10.0%), 5743/Las Derrumbadas (8.0%), 5701/Huilapitzo (6.8%), 5704B/San José Chiapa (4.4%), 5707/Tlaxcala (4.2%), 5704C/San Salvador El Seco (3.0%), 5744/Soltepec (2.2%), 5708/La Malinche (1.7%) y 5704A/Huamantla (1.6%).

A pesar de que la menor altura de la cuenca se encuentra situada a una elevada altitud similar a la de la Ciudad de México, la mayor parte de ella (80.1%) se localiza por debajo de los 2700 msnm. El resto (19.9%) fluctúa entre 2700 y 5610 msnm, la mayor altitud reportada para México, el Pico de Orizaba. Escasamente, 2.1%, se localiza por encima de los 3 500 msnm. Sin embargo, 47.7% de la cuenca se localiza entre los 2350 y los 2500 msnm. Este factor —altitud—

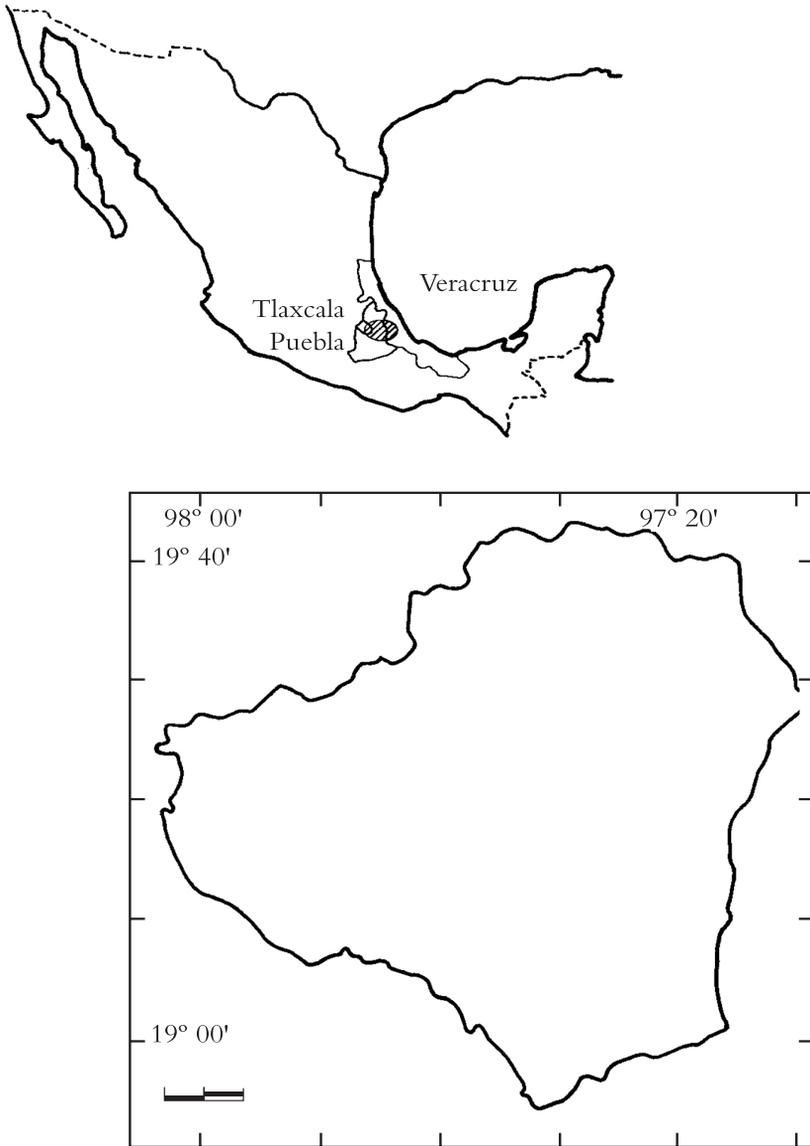


FIGURA 1. Localización y ubicación geográfica de la Cuenca Oriental.

es muy importante ya que ha sido decisivo para considerar a la Cuenca Oriental como fuente potencial de suministro de agua para las ciudades de Puebla y México ya que, al estar situada a una altura similar a estas ciudades, disminuyen grandemente los gastos de bombeo.

TABLA 1
UNIDADES AMBIENTALES FÍSICAS (UAF, SISTEMAS TERRESTRES)
DE LA CUENCA ORIENTAL

Núm.	Clave	UAF	Núm.	Clave	UAF
1	5701	Huilapitzo	8	5708	La Malinche
2	5702	Tlaxco	9	5740	Cofre de Perote-Pico de Orizaba
3	5704	Perote-Tepeaca-Molcaxac	10	5741	Teziutlán-Xiutetelco
4	5704A	Huamantla	11	5742	Ciudad Serdán
5	5704B	San José Chiapa	12	5743	Las Derrumbadas
6	5704C	San Salvador El Seco	13	5744	Soltepec
7	5707	Tlaxcala			

Fuente: Alcocer *et al.*, no publicado.

Clima

Los climas de un área están determinados por la temperatura y la cantidad de lluvia, características que a su vez están determinadas por una serie de factores geográficos, dentro de los cuales destacan por su importancia la latitud y la altitud.

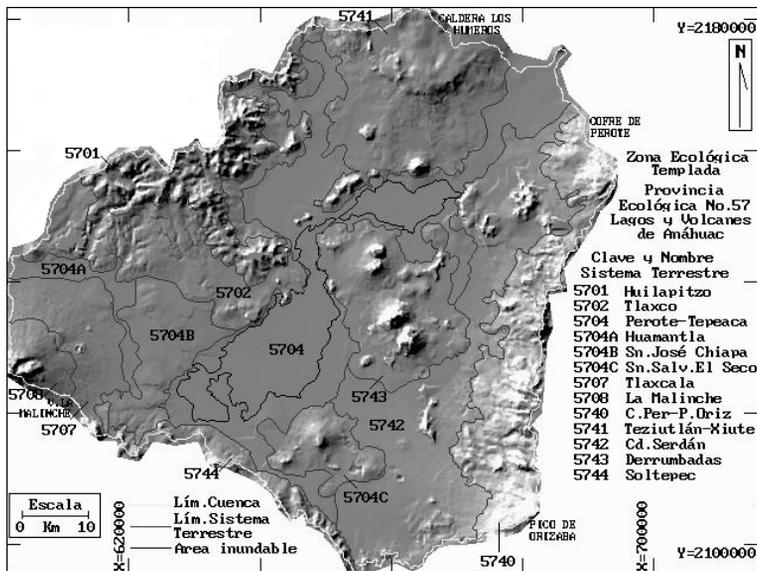


FIGURA 2. Mapa Digital del Terreno y Unidades Ambientales Físicas (uaf) de la Cuenca Oriental.

La Cuenca Oriental se encuentra ubicada entre los 18°57' y los 19°44' de latitud Norte. Por su latitud, el área de estudio se localiza al sur del Trópico de Cáncer, es decir, en la zona tropical del país. Así mismo, la Cuenca Oriental presenta altitudes que van desde los 2 300 msnm en la mayor parte de la superficie de la cuenca, hasta los 4 461 msnm en La Malinche, 4 250 msnm en el Cofre de Perote y 5 610 msnm en el Pico de Orizaba. De acuerdo con la latitud, el clima de la cuenca sería tropical, pero éste está modificado por la orografía (p.e., los volcanes la Malinche, el Cofre de Perote y el Pico de Orizaba) y por la configuración de la cuenca, así como por la posición perpendicular de ésta con respecto a la trayectoria del flujo aéreo (Gasca, 1981).

La interacción de la latitud y la altitud de la Cuenca Oriental resulta en la presencia de los siguientes cinco tipos de clima de acuerdo con el sistema de clasificación de Köppen modificado por García (1988) para las condiciones de México: BS1 (seco estepario semiárido), C(W1) (templado subhúmedo con lluvias en verano), C(W2) (templado subhúmedo con lluvias en verano), ETH (frío) y EFH (muy frío).

El clima semiárido se distribuye en la parte central de la cuenca, la cual tiene una altitud entre 2 300 y 2 400 msnm, es decir, en la parte más baja de la misma. El clima (templado subhúmedo con lluvias en verano) rodea por completo al BS1 en forma concéntrica. Ambos climas son los predominantes en la cuenca, no obstante, el C(W1) se ubica entre 2 400 y 3 000 msnm en la parte norte y entre 2 300 y 2 500 msnm en las zonas este, oeste y sur. En el caso de la Cuenca Oriental, el clima C(W1) se presenta como una transición entre los climas BS1 y C(W2). El clima C(W2) se presenta en zonas más elevadas que los dos climas anteriores, a una altitud entre los 2 500 y los 3 700 msnm. El clima frío (ETH) se localiza en las cumbres de La Malinche y el Cofre de Perote, así como en el volcán Pico de Orizaba, a alturas de entre 3 700 y 4 400 msnm. Finalmente, el clima muy frío (EFH) se ubica sólo en la cumbre del Pico de Orizaba entre 4 400 y 5 600 msnm.

Geología (figura 3)

La Cuenca Oriental forma parte de la provincia Lagos y Volcanes del Anáhuac, que a su vez se encuentra incluida en el Eje Neovolcánico Transversal. Este último es una franja de rocas volcánicas de diversos tipos y texturas, emitidas sucesivamente por numerosos volcanes durante el Cenozoico; actualmente estas rocas constituyen un extenso bloque superpuesto a las rocas del Mesozoico que atraviesan la República Mexicana en dirección este-oeste (INEGI, 1990).

En la Cuenca Oriental destacan dos de los estrato-volcanes más altos del país, el Pico de Orizaba o Citlaltépetl y La Malinche y dos lagunas someras Tepyahualco y Totolcingo, producto del afloramiento del acuífero subterráneo y de las precipitaciones pluviales (Cruickshank, 1992). También se presentan como

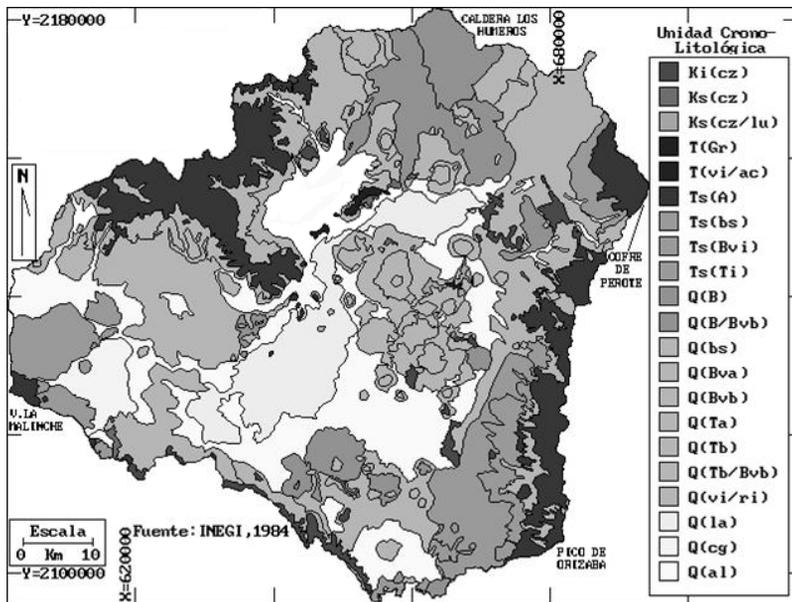


FIGURA 3. Unidades geológicas de la Cuenca Oriental.

un rasgo característico de la cuenca, seis conos de explosión freática o freato-magmática cuyo fondo está ocupado por agua, que reciben el nombre local de axalapascos; éstos son los lagos-cráter (maars) Alchichica, Quechulac, Atexcac, La Preciosa (Las Minas), Aljojuca y Tecuitlapa. La alimentación de estos lagos es similar a la de los lagos anteriores (Álvarez, 1950 y Cruickshank, 1992).

Estos elementos fisiográficos se encuentran inmersos en una amplia planicie que es el resultado del sepultamiento de pliegues en rocas marinas del Mesozoico por la acumulación de rocas volcánicas, derrames lávicos y una enorme cantidad de sedimentos pirocásticos (Gasca, 1981). De acuerdo con lo anterior y con base en la regionalización territorial de la cuenca, se presentan cinco geoformas dominantes: sierra, lomerío, llanura, bajada y valle.

Las secuencias expuestas en el área de la cuenca están formadas principalmente por rocas originadas durante el Cuaternario, seguido por las del Terciario y en menor proporción, las silícicas del Cuaternario que son dominantes.

En segundo lugar se encuentra material aluvial del Cuaternario originado por la acción fluvial y corresponde a suelos poco consolidados de arena gruesa ligeramente gravosa, compuestos por vidrio volcánico, feldespatos, micas y fragmentos de roca (SPP/INEGI, 1984a, b, c).

También están presentes las andesitas pertenecientes al Terciario Superior que se localizan en las zonas con mayor altitud (Gasca, 1981; Reyes, 1979 y SPP/

INEGI 1984a, b, c). En menor proporción se encuentran sedimentos lacustres formados principalmente por depósitos de limo, arenas y materia orgánica cubiertos por agua en la época lluviosa (suelo lacustre) (SPP/INEGI, 1984a, b, c). Por último, también se presentan en menor proporción basalto, toba básica y toba intermedia.

Vegetación terrestre (figura 4)

De acuerdo a la regionalización fitogeográfica de Rzedowski (1981), Oriental se ubica en dos provincias florísticas: Serranías Meridionales y Altiplanicie. A la provincia Serranías Meridionales pertenecen el Eje Neovolcánico, la Sierra Madre del Sur y el complejo montañoso del norte de Oaxaca. Incluye las elevaciones más altas de México (Pico de Orizaba y La Malinche, entre otras) y predominan los bosques de *Pinus* y *Quercus* que caracterizan algunas porciones de la Cuenca Oriental, particularmente las de mayor altitud. La provincia de la Altiplanicie corresponde a la región fisiográfica del mismo nombre que en México se extiende desde Chihuahua y Coahuila hasta Jalisco, Michoacán, el Estado de México, Tlaxcala y Puebla. La vegetación predominante consiste en matorrales xerófitos.

La Cuenca Oriental presenta elementos florísticos de ambas provincias, sin embargo, en la mayor parte de la cuenca (65%) la vegetación nativa ha sido sustituida por agricultura, tanto de temporal (61%) con cultivos anuales y permanentes como de riego (2%), así como por pastizal inducido para uso ganadero (5.5%). El principal cultivo es la alfalfa, aunque también se cultivan cebada, sorgo, haba, maíz, papa y trigo. Dentro de la agricultura de riego se cultiva cebada, avena, alfalfa, haba, cacahuete, frijol y maíz.

De la vegetación nativa aún existente, los principales tipos de vegetación que se encuentran son bosques de oyamel, de pino, de pino-encino y de encino-pino, matorral desértico rosetófilo con izotal, pastizal halófito y pradera de alta montaña. Los bosques mencionados ocupan un total de 14.5% del territorio total de la cuenca con 8.8% de pino, 1.9% de pino-encino y 1.4% de oyamel; el resto ocupa porcentajes menores.

El matorral desértico rosetófilo ocupa 7.5% del total de la cuenca, el pastizal halófito 6.2% y la pradera de alta montaña 0.4%.

Hidrología superficial (figura 5)

Oriental es una cuenca endorréica en la que los escurrimientos de agua captada por precipitación no fluyen al mar ni a otra cuenca, sino que por un lado se acumulan en el manto freático y por el otro se evaporan. Cuenta con una superficie aproximada de 4 982 km² (Alcocer *et al.*, 1998) y es reconocida por el INEGI (SPP/INEGI, 1984d, e, f) con el nombre de subcuenca de la laguna de Totolcingo, perteneciente a la cuenca del río Atoyac, dentro de la Región Hidrológica núm. 18 del río Balsas.

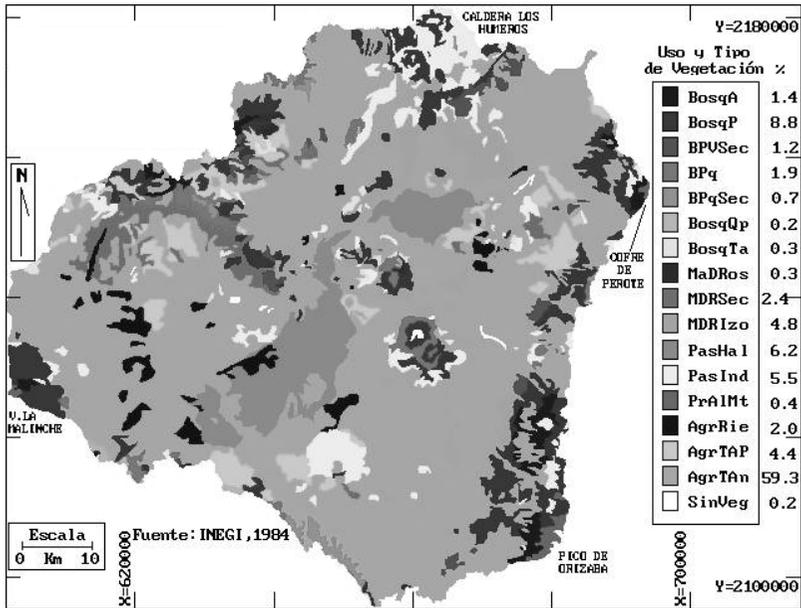


FIGURA 4. Vegetación y uso de suelo en la Cuenca Oriental.

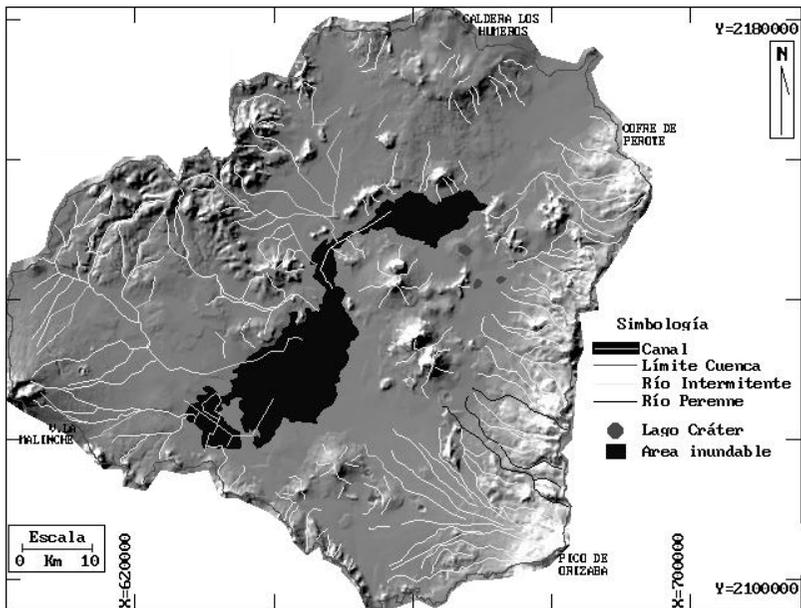


FIGURA 5. Hidrología superficial de la Cuenca Oriental.

El sistema hidrológico superficial es prácticamente inexistente debido a que la mayor parte de la superficie de la cuenca presenta depósitos piroclásticos de edad reciente que favorecen una alta infiltración. Por lo tanto y conjuntamente con el hecho de que la época de lluvias tiene una estacionalidad muy marcada y breve, en la cuenca no existen escurrimientos superficiales perennes (SPP/INEGI, 1984d, e, f).

Los escurrimientos de temporal en la cuenca son arroyos pequeños limitados a la ladera occidental de la sierra Cofre de Perote-Pico de Orizaba y a las laderas oriental y norte del volcán La Malinche. Los arroyos se asocian a abanicos aluviales en las laderas de estos volcanes. También existen otros arroyos de temporal en las laderas de los cerros Alto, San Gabriel y El Conejo, así como en las laderas del Cordón La Vigea Alta, en la parte norte de la cuenca.

Los arroyos de temporal más sobresalientes son La Caldera y Xonecuila, los cuales se originan en el parteaguas occidental de la cuenca, recibiendo el agua de los pequeños arroyos de las laderas de La Malinche. Los arroyos Quetzalapa y Piedra Grande que bajan por la ladera occidental de la sierra Cofre de Perote-Pico de Orizaba se pierden al llegar a la llanura de la cuenca debido a que su agua se infiltra hacia el subsuelo. Todos los demás escurrimientos de temporal desaparecen por la infiltración de sus aguas mucho antes de llegar a la parte más baja de la cuenca que corresponde a las lagunas de Totolcingo y Tepeyahualco (SPP/INEGI, 1984d, e, f).

Existen manantiales en las partes altas de los tres volcanes y en el cerro San Gabriel, así como en El Carmen, en las cercanías de la estación Los Manantiales y cerca de Ciudad Serdán. Asimismo se presenta un manantial de aguas termales (92°C) ubicado en Libres (Maderey, 1967).

En la parte central de la cuenca, que corresponde a la altitud más baja, se forman dos lagunas someras otrora perennes, luego de temporal, la laguna de Totolcingo (El Carmen) y la laguna de Tepeyahualco (El Seco). Ambas lagunas cubren una superficie aproximada de 290 km². Existen dos hipótesis acerca del origen de las lagunas. Knoblich (1978) opina que el fondo de las lagunas se encuentra por debajo del nivel medio del manto freático, por lo tanto su profundidad varía de acuerdo a la fluctuación del nivel de las aguas subterráneas. Reyes (1979) y Gasca (1981), por otro lado, explican que las lagunas se forman por la acumulación del agua pluvial debido a la presencia de una capa arcillosa impermeable. Sin embargo, Cruickshank (1992) indica que se forman principalmente como resultado del afloramiento del agua subterránea en la época de lluvias del año. Actualmente dichas lagunas no se forman cada año y se han convertido en cuerpos acuáticos de llenado episódico (Alcocker *et al.*, 1997 y 1998).

Adicionalmente, en Oriental se encuentran seis lagos-cráter cuya principal fuente de agua es aportada por el manto freático de la misma. Tales lagos son Alchichica, La Preciosa (Las Minas), Quechulac, Atexcac, Aljojuca y Tecuitlapa.

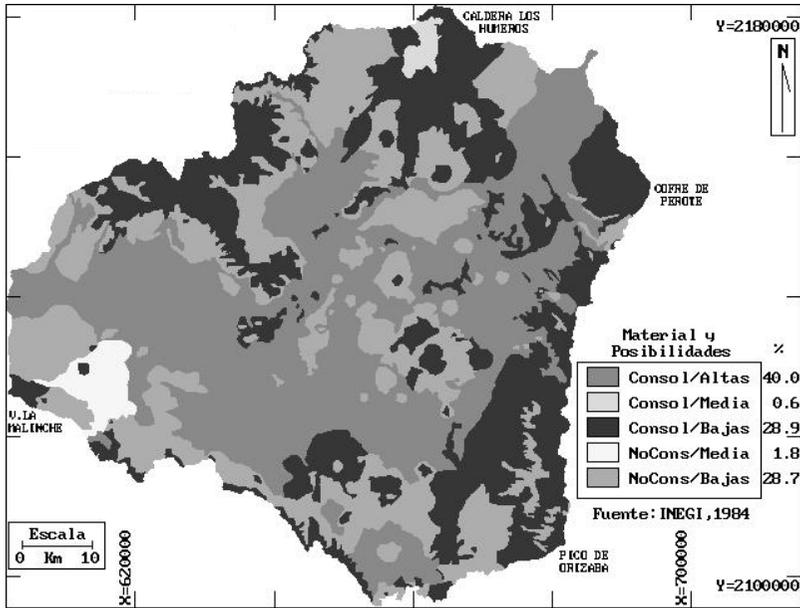


FIGURA 6. Unidades hidrogeológicas de la Cuenca Oriental.

En conjunto cubren un área de 4.13 km². Las características del agua de estos lagos evidencian el origen subterráneo de ésta, ya que por su interrelación con las rocas y sedimentos subterráneos, el agua presenta diversos grados de salinidad y composición química (Vilaclara *et al.*, 1993) que varían de un lago a otro (Gasca, 1981).

Hidrología subterránea (figura 6)

El sistema hidrológico subterráneo de la cuenca está mejor desarrollado que el superficial. Como se mencionó anteriormente, la mayor parte de los escurrimientos pluviales se infiltran hacia el subsuelo, formándose un manto acuífero extenso, el cual constituye un recurso de abastecimiento hídrico muy valioso.

La relevancia de la Cuenca Oriental como un área almacenadora de agua subterránea estriba en el hecho de que 40% de ésta presenta materiales consolidados de alta permeabilidad con posibilidades altas de presencia de recurso hídrico subterráneo. Dichos materiales se encuentran en toda el área baja de la cuenca.

No obstante, los materiales consolidados y los no consolidados con conductividades hidráulicas bajas también son abundantes y están localizados en las partes altas y laderas bajas de la cuenca. La presencia de materiales no consolidados (zona de San Juan Ixtenco) y consolidados con conductividades hidráulicas medias (zona de Los Humeros) es escasa.

En la Cuenca Oriental el manto acuífero se encuentra a una profundidad de menos de un metro bajo la superficie en las porciones más bajas. Dentro de la microcuenca de Alchichica el nivel del lago ha descendido más de un metro. Sin embargo, la falta de sistema de monitoreo hidrogeológico de largo tiempo, no permite evaluar el origen del descenso del nivel en el lago, ni en el acuífero regional. Dos hipótesis que se han manejado para tratar de explicar estos descensos son la sobrexplotación del acuífero o un efecto del cambio climático. La regeneración de éste es resultado de la precipitación pluvial y por una fuerte afluencia de los cerros adyacentes, especialmente de la región de La Malinche. Las aguas procedentes de los escurrimientos temporales en el periodo de lluvias, se infiltran hacia el subsuelo en las partes bajas de las laderas de los cerros, regenerando el manto subterráneo (Cruickshank, 1992). Debido a la cantidad de agua contenida en dicho manto y a su escasa profundidad, el agua subterránea aflora hacia la superficie formando las lagunas de Totolcingo (El Carmen) y Tepyahualco (El Salado) y los lagos-cráter Alchichica, Atexcac, Quechulac, La Preciosa, Aljojuca y Tecuitlapa (Cruickshank, 1992 y Gasca, 1981). El equilibrio de las aguas subterráneas está establecido por la evaporación que se lleva a cabo en dichos cuerpos de agua (Knoblich, 1971, 1973, 1978), sin embargo su volumen ha disminuido en los últimos años, poniendo en riesgo su permanencia (Alcoccer y Escobar, 1990 y Alcoccer *et al.*, 1998).

Las aguas subterráneas de la cuenca tienen un tiempo de residencia largo lo cual ha dado como resultado una amplia disolución de las rocas por el agua subterránea. Por ejemplo, la disolución de las calizas, ha originado que se encuentren altas concentraciones de calcio en el agua subterránea de esta área. En consecuencia, aunque es posible extraer grandes cantidades de agua subterránea, ésta solo es parcialmente apta como agua potable, industrial o de riego, debido a su salinidad (Knoblich, 1971, 1973, 1978). En la zona que se encuentra entre La Malinche y Huilapitzo, el agua subterránea presenta una mejor calidad, sin embargo, en esta parte el manto acuífero es mucho más profundo lo cual incrementa los costos de extracción (Knoblich, 1971, 1973, 1978). A pesar de lo anterior, en la actualidad este recurso subterráneo es considerado por la CNA como una fuente potencial de abastecimiento —7 m³/s— para la Ciudad de México (SOSP-DDE, 1982 y NRC *et al.*, 1995). Esta opción ha recibido mucha oposición por parte de los habitantes de la cuenca, por lo cual, se ve poco probable. Asimismo, la Ciudad de Puebla, ha expresado interés en importar el agua de esta cuenca. En el ámbito mundial, se está enfatizando el uso sustentable por cuenca, y tratando de reducir la exportación del agua de una cuenca a otra, debido a los problemas ecológicos y sociales relacionados con la exportación de agua de una cuenca a otra.

Dentro de la cuenca existen un gran número de pozos; la carta de aguas subterráneas (SPP/INEGI, 1984g, h, i) registraba para la fecha, aproximadamente

noventa. Sin embargo, los pobladores indican que a menudo se abren nuevos pozos para riego, por lo que resulta evidente que el número de éstos en la actualidad es mucho mayor. Los pozos se concentran principalmente en cuatro sitios, uno hacia el este entre los lagos Alchichica, La Preciosa y Quechulac, otro al oeste cerca de la población Francisco Villa, uno más entre Lomas de Jonguito y Cuapiaxtla y por último, al norte de San Salvador El Seco (SPP/INEGI, 1984g, h, i).

Cabe destacar la presencia de varios géiseres en Los Humeros, al norte de la cuenca, los cuales han sido aprovechados por la Comisión Federal de Electricidad para el establecimiento de una planta geotérmica generadora de energía eléctrica (Yáñez, 1990).

De acuerdo con el Decreto publicado el 19 de agosto de 1954 (SPP, 1983), prácticamente toda la cuenca está clasificada como área de veda para la explotación del agua subterránea. Sin embargo, la Cuenca Oriental queda comprendida en la Fracción III, la cual indica que “la veda se ha establecido con el fin de proteger los mantos acuíferos explotados con diversos fines, de los que, aún en el caso de que estén abatidos, es necesario extraer el agua para cubrir las necesidades de la región de que se trate...” (Maderey, 1967).

DIAGNÓSTICO DE LOS IMPACTOS HUMANOS

Para analizar en forma más armónica la situación de la Cuenca Oriental con relación a sus recursos hídricos, se han reunido bajo cinco grandes rubros los efectos que las actividades humanas han generado en el área de estudio.

Actividades en la cuenca de captación/drenaje

Dos actividades son responsables prioritariamente de modificar drásticamente la cuenca: el pastoreo de mamíferos silvestres y domesticados, así como la modificación de la vegetación natural llevada a cabo por el hombre. Los efectos del pastoreo y especialmente el sobrepastoreo se han traducido en cambios en los patrones de drenaje y en un incremento en las cargas de sedimentos de la escorrentía. Los cambios físicos más importantes en la cuenca son la formación de veredas por los animales así como la ruptura de las costras superficiales protectoras; ambos eventos guían a la movilización de partículas superficiales del suelo y por ende a la erosión.

Los cambios en la naturaleza de la vegetación de la cuenca es igualmente o más importante que el sobrepastoreo. Geréz (1983) explica que hace 500 años, 60% de Oriental se encontraba forestada (e.g., *Pinus cembroides*, *Juniperus deppeana*, *Quercus* spp.) y el restante 40%, a excepción de las zonas inundadas del centro de la cuenca, eran pastizales (e.g., *Distichlis spicata*, *Suaeda* spp.). Sin embargo,

65% de la vegetación nativa de la cuenca ha sido remplazada por especies cultivables y pastos introducidos.

La remoción de la vegetación natural de enraizamiento profundo (árboles)—deforestación— y su substitución por pastos y especies de cultivo de enraizado superficial han dado por resultado un cambio en la hidrología local. Estas modificaciones han repercutido, seguramente, en la salinidad, composición y estacionalidad de la escorrentía. Por lo tanto, el agua subterránea subyacente, en la mayor parte del subsuelo de la cuenca salina, se acerca a una distancia tal (p.e., hasta de un metro en las porciones más bajas de la cuenca) que por capilaridad simple alcanza la superficie. La evaporación actúa e incrementa la salinidad del suelo; el agua que lava estos suelos va a parar a los cuerpos receptores finales (lagos terminales). El resultado obvio es un incremento en la salinidad de éstos (p.e. Totolcingo).

El sobrepastoreo, la remoción de la vegetación y la salinización han guiado a una erosión severa y a la desertización (degradación de suelos) de gran parte de la cuenca.

Información no publicada por Alcocer *et al.* muestra una fuerte asociación entre la pendiente del terreno y el grado de erosión presente. La erosión alta y muy alta es común en las elevaciones con una pendiente mayor a 30%; ésta se ubica principalmente en las estribaciones de los cerros así como en las zonas de barrancas. La situación es especialmente crítica en las zonas deforestadas del Cofre de Perote así como del Pico de Orizaba. En las estribaciones de algunos cerros y en las zonas de malpaís, con pendientes mayores a 10% y menores de 30%, se encuentra erosión moderada. Finalmente, la erosión ligera se presenta en las llanuras, valles y planicies con una pendiente de 0 a 8%. La baja pendiente y las características edáficas le confieren al suelo una menor vulnerabilidad a la erosión.

Desvío de afluentes

Existían numerosos arroyos y manantiales (Knoblich, 1973) en la cuenca que, a pesar de su temporalidad, proporcionaban una fuente de agua dulce a los habitantes de la cuenca. Con el incremento en el uso de éstos (agua potable, riego, etc.), especialmente siguiendo al crecimiento poblacional de la zona, se han generado una serie de efectos derivados. El desvío de los afluentes ha guiado a una disminución o desaparición total de cuerpos acuáticos superficiales (Reyes, 1979), como es el caso de Tepeyahualco que está seco desde hace varios años y de Totolcingo que ha pasado de ser un lago perenne a uno temporal y, finalmente, episódico (Alcocer *et al.*, 1997). El efecto principal del desvío de los afluentes ha sido doble: un decremento en el volumen y un incremento en la salinidad.

La disminución en el volumen es acompañada por un decremento en el área lacustre, especialmente en los lagos someros (Totolcingo y Tepeyahualco), lo cual ha expuesto áreas amplias del lecho lacustre. Este hecho permite que sales y se-

dimentos sean transferidas a otras partes de la cuenca vía eólica (tolvaneras). Asimismo, la disminución en el nivel de los lagos-cráter, ha eliminado las áreas litorales someras que proveían de refugio a la biota (p.e., aves acuáticas residentes y migratorias, larvas y juveniles de peces), lo cual ha tenido un impacto importante en la conservación biológica y en la economía regional. Vale la pena hacer hincapié en dos ejemplos de lagos, uno profundo (Alchichica) y uno somero (Tecuitlapa).

En Alchichica, los depósitos de tufa previamente sumergidos, han quedado expuestos lo cual destruye una gran variedad de microhábitats disminuyendo la biodiversidad del lago (Escobar y Alcocer, 2002). La situación es trágica si se considera que en menos de dos años la disminución de nivel del lago se ha acelerado alcanzando casi medio metro.

Al descender el nivel del agua de Tecuitlapa se dividió el lago en tres porciones: el cuerpo principal en forma de media luna, un lago con amplias fluctuaciones de nivel, Tecuitlapa Norte (Alcocer *et al.*, 1999) y un pequeño lago temporal, Tecuitlapa Sur (Alcocer *et al.*, 2001). Desde hace algunos años, Tecuitlapa Norte y Tecuitlapa Sur se secaron y la profundidad de Tecuitlapa disminuyó. En fechas recientes, (febrero 2004), Tecuitlapa se redujo aún más y se dividió en dos porciones por lo cual su persistencia a futuro es incierta.

Un incremento en la salinidad de los lagos se traduce en cambios químicos, físicos y biológicos. El incremento en la salinidad excede la capacidad de solubilidad de algunas sales las cuales precipitan, alterando la composición iónica de la solución remanente. La principal sal depositada en los lagos es el sesquicarbonato de sodio (tequesquite) muy común en los márgenes de Totolcingo y los dos pequeños cuerpos acuáticos de Tecuitlapa. El incremento en salinidad disminuye la capacidad de solubilidad del oxígeno. Sin embargo, los cambios más evidentes con el aumento de la salinidad se expresan en la biota. Un ejemplo muy claro lo constituye la abundante presencia de la cianobacteria *Spirulina maxima* y las larvas de los insectos *Ephydra hians* y *Culicoides occidentalis* exclusivamente en los lagos que han alcanzado una elevada concentración de sales (e.g., Totolcingo).

Contaminación

De todos los cuerpos acuáticos que se encuentran en la Cuenca Oriental, los más sensibles a la contaminación son los terminales, o sean aquellos que se encuentran en las partes más bajas de la misma. Más aún, la ausencia de efluentes de los lagos permite que los contaminantes se vayan concentrando.

Afortunadamente, al momento parece ser que la contaminación de los recursos hídricos de la cuenca es moderada. Sin embargo, hace falta realizar una investigación específica para reconocer si existe o no la presencia de contaminantes en los ríos, lagos o agua subterránea de la cuenca. Los residuos sólidos son claramente visibles en los lagos; latas, bolsas, envases, y en general, toda una serie de dese-

chos. Adicionalmente, jabones, detergentes y blanqueadores se emplean comúnmente para la higiene personal y lavado de ropa, mismos que son desechados a lo largo de la zona litoral de los lagos-cráter y las principales corrientes.

Debido a que la agricultura es una actividad preponderante y creciente en la zona, es de esperarse que tarde o temprano los recursos hídricos sean impactados con fertilizantes y plaguicidas. Este punto es especialmente importante en relación con las aguas subterráneas ya que son empleadas para riego y consideradas como fuente potencial de abastecimiento de agua potable para grandes ciudades como Puebla y México.

Impactos directos en los recursos bióticos de relevancia económica local

El impacto más directo sobre la biota acuática lo constituye la disminución del recurso hídrico. Sin embargo, otros procesos como la introducción de especies exóticas puede dar por resultado la eliminación de especies nativas de importancia económica o ecológica. En los lagos-cráter, se han introducido carpas japonesas *Cyprinus carpio* y *Carassius auratus* en Aljojuca y Tecuitlapa. Asimismo, en Quechulac y La Preciosa se desarrollan cultivos de trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) por parte de los habitantes de la zona. Sin embargo, algunas de ellas han escapado y establecido en los lagos. Al momento no existen estudios del impacto de estas especies exóticas introducidas sobre las poblaciones locales de charales, sin embargo al ser carnívoras, éstas depredarán juveniles y adultos de charales. Resulta necesario recordar que los charales de los lagos-cráter (*Poblana alchichica*, *P. letholepis*, *P. squamata*) son endémicos de cada uno de ellos y que, por lo tanto, su existencia está puesta en riesgo no sólo por la disminución del nivel de los lagos y la contaminación, sino ahora por la presencia de especies depredadoras más grandes y voraces.

Aparte de las introducciones, son pocos los casos de impactos directos en otros organismos. Sin embargo resulta importante mencionar que las aves acuáticas han disminuido notablemente debido a la reducción o eliminación de la zona litoral de los lagos (menor disponibilidad de zonas de alimentación, refugio, reproducción, etc.), así como al incremento de la caza no controlada llevada a cabo por locales y foráneos. Aunque con objetivos científicos, la especie endémica de salamandra ambistomática (ajolote) de Alchichica, *Ambystoma taylorii*, es frecuentemente sustraída del lago.

Impactos físicos en la cuenca lacustre

El impacto físico más importante en la cuenca es la sobreextracción de agua subterránea para la irrigación y suministro de agua para grandes ciudades. Como se ha mencionado, la agricultura es una actividad importante y creciente en la cuenca. Originalmente la agricultura dependía de la precipitación pluvial solamente. Hoy en día, la irrigación con aguas subterráneas está desplazando a la

de temporal. Sin embargo, el riego por aspersión en un clima seco, como es la parte central de la cuenca, se traduce en una pérdida del recurso antes de alcanzar el suelo y una concentración de las sales disueltas que terminan por salinizar el terreno.

Oriental está situada casi 100 metros por encima de la Ciudad de México, de forma tal que sus “bastos” recursos de agua subterránea han sido considerados para ser transportados por gravedad para cubrir los requerimientos de grandes ciudades (e.g., la Ciudad de México, SOSP-DDF, 1982; NRC *et al.*, 1995). En 1978, Knoblich estimó que una extracción de 2000 L/s causaría que Totolcingo se secara y que Tepeyahualco así como que en los lagos cráter disminuyera su nivel en un metro. En la actualidad las predicciones de Knoblich se han cumplido con creces de forma tal que Tepeyahualco y Totolcingo se encuentran secos y el nivel de los lagos cráter ha disminuido en más del metro predicho, lo cual pone en serio riesgo la persistencia de estos ecosistemas (Alcocer y Escobar, 1990; Alcocer y Williams, 1993 y Alcocer *et al.*, 1998).

Los sedimentos de los lagos salinos contienen minerales de valor comercial, bicarbonato y cloruro de sodio, en este caso. La extracción de éstas frecuentemente daña físicamente la estructura natural de las cuencas lacustres e indirectamente, modifica la química lacustre y consecuentemente la biota. La construcción de diques para favorecer la extracción de tequesquite o para crear tierras para cultivo guía a la desecación de grandes extensiones de terreno, tal es el caso de Totolcingo y Tepeyahualco (Ewald *et al.*, 1994).

Asimismo, al ser sobre-explotados los ricos recursos hídricos de la cuenca ya sea para agua potable, riego o para la obtención de sales, llevará como consecuencia un asentamiento general de la zona con el consecuente fracturamiento del suelo. Este mismo fenómeno (i.e. subsidencia del terreno por sobreextracción de agua subterránea) sucedió en el área del lago de Texcoco, al oriente de la Ciudad de México (Alcocer y Williams, 1996). Adicionalmente, la construcción de dos carreteras (Zacatepec-El Carmen y Zacatepec-Oriental) y una vía de tren fragmentó Totolcingo en cuatro porciones.

Finalmente, zonas naturales de recarga (e.g., Las Derrumbadas) están siendo destruidas y transportadas como material para construcción en forma de grava y arena. El número de empresas dedicadas a la extracción de este material ha aumentado considerablemente en los últimos años.

CONCLUSIONES

La mayoría de los mexicanos viven en las regiones áridas y semiáridas que representan dos tercios del territorio nacional en donde el agua es escasa. Causas naturales y humanas favorecen la degradación de los recursos epicontinentales

mexicanos. Por lo anterior existe una clara necesidad de desarrollar e implementar programas de uso sustentable del agua a nivel cuenca. Sin embargo, la tasa de degradación acelerada de los recursos epicontinentales mexicanos hace pensar que no habrá suficiente tiempo para llevar a cabo las evaluaciones integrales de las cuencas para contar con las herramientas necesarias para la implementación de los programas de uso sustentable de agua antes de que los lagos se hayan secado. El caso de la Cuenca Oriental claramente ilustra la tendencia de desecación que siguen los recursos acuáticos epicontinentales mexicanos. La deforestación, el sobrepastoreo, la sobreexplotación de los acuíferos y la salinización de los suelos derivada de malas prácticas de riego, han inducido procesos de erosión severa y desertización generalizada en la cuenca. De esta forma, las actividades humanas pueden estar provocando las siguientes consecuencias negativas: clima local más caliente y seco, escasez de agua, tormentas de polvo, salinización, todas ellas derivando en la disminución de la sustentabilidad de la cuenca incluyendo actividades productivas (forestería, agricultura, ganadería). Los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la cuenca se encuentran amenazados seriamente. A pesar de que la cuenca está clasificada como área de veda para extracción de agua subterránea desde 1954 y categorizada como Área Hidrológica Prioritaria por la Conabio desde 1998 (Arriaga Cabrera *et al.*, 2000), no se ha establecido programa alguno de uso sustentable del agua para esta importante cuenca.

REFERENCIAS

- Alcocer, J. y E. Escobar, 1990, "The drying up of the Mexican Plateau Axalapazcos", *Salinet*, 4, pp. 34-36.
- Alcocer, J. y W.D. Williams, 1993, "Lagos salinos mexicanos", en Salazar-Vallejo, S.I. y N.E. González (eds.), *Biodiversidad marina y costera de México*, Conabio y Ciqro, México, pp. 849-865.
- Alcocer, J. y W.D. Williams, 1996, "Historical and recent changes in Lake Texcoco, a saline lake in Mexico", *International Journal of Salt Lake Research*, 5 (1), pp. 45-61.
- Alcocer, J., A. Lugo, E. Escobar y M. Sánchez, 1997, "The macrobenthic fauna of a former perennial and now episodically filled Mexican saline lake", *International Journal of Salt Lake Research*, 5 (3), pp. 261-274.
- Alcocer, J., A. Lugo, M.R. Sánchez, M. Chávez y E. Escobar, 1998, "Threats to the saline lakes of the Oriental basin, Mexico, by human activities", *Verh. Int. Verein. Limnol*, 26, pp. 1383-1386.
- Alcocer, J., E. Escobar, A. Lugo y L.A. Oseguera, 1999, "Benthos of a perennially astatic, saline, soda lake in Mexico", *International Journal of Salt Lake Research*, 8 (2), pp. 113-126.

- Alcocer, J., E. Escobar, A. Lugo, L.M. Lozano y L.A. Oseguera, 2001, "Benthos of a seasonally-astatic, saline, soda lake in Mexico", *Hydrobiologia*, 466, pp. 291-297.
- Álvarez, J., 1950, "Contribución al conocimiento de los peces de la región de Los Llanos, estado de Puebla (México)", *An. Esc. Nac. Cienc. Biol., Méx.* 6 (1-4), pp. 81-107.
- Arriaga Cabrera, L., V. Aguilar Sierra y J. Alcocer Durand, 2000, *Aguas continentales y diversidad biológica de México*, CONABIO, México, 327 pp. + 1 mapa.
- Barradas, V.L., 1983, "Capacidad de captación de agua a partir de la niebla en *Pinus montezumae*, Lambert, de la región de las grandes montañas del Edo. de Veracruz", *Biótica*, 8 (4), pp. 427-431.
- Cruickshank, V.L.C., 1992, "Relación entre las aguas superficiales y subterráneas en una cuenca", *Ingeniería Hidráulica en México*, 7, pp. 53-63.
- Escobar, E. y J. Alcocer, 2002, "*Caecidotea williamsi* (Crustacea: Isopoda: Asellidae), a new species of isopod from a saline crater-lake in the Central Mexican Plateau", *Hydrobiologia*, 477, pp. 93-105.
- Ewald, U., E. Seele y J. Alcocer, 1994, "Tequezquite. A story with loose ends. (The occurrence of natural soda in Mexico)", *Journal of Salt-History*, 2, pp. 71-100.
- Gasca, A., 1981, *Algunas notas de la génesis de los lagos-cráter de la cuenca de Oriental. Puebla-Tlaxcala-Veracruz*, Departamento de Prehistoria, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Colección Científica Prehistoria 98, México, 55 p.
- Geréz, P., 1983, "Crónica del uso de los recursos naturales en la cuenca de Perote-Libres", en Goldberg, A.D. (comp.), *El Cofre de Perote. Investigaciones ecológicas en un área conflictiva*, INIREB, Xalapa, pp. 11-16.
- Golberg, A.D. y H. García, 1983, "Las cortinas rompevientos: posibilidades de utilización en el Valle de Perote", en Golberg, A.D. (comp.), *El Cofre de Perote. Investigaciones ecológicas en un área conflictiva*, INIREB, Cuadernos de Divulgación, núm. 9, Xalapa, pp. 63-67.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1990, *Geología de la República Mexicana*, INEGI, México, 88 p.
- Knoblich, K., 1971, "Posibilidades de poner en explotación aguas subterráneas en la cuenca de Puebla-Tlaxcala", *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala*, 9, pp. 7-10.
- Knoblich, K., 1973, "Las condiciones de las aguas subterráneas en la cuenca de El Seco-Oriental (Puebla-Tlaxcala/México)", *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala*, 9, pp. 1-4.
- Knoblich, K., 1978, "La cuenca de El Seco/Oriental. Una reserva de agua subterránea natural para el futuro", *Comunicaciones Proyecto Puebla/Tlaxcala*, 15, pp. 231-234.
- Koterba, M. y S. Oliveri B., 1983, "Manejo actual de los recursos naturales en el Valle de Perote", en Golberg, A.D. (comp.), *El Cofre de Perote. Investigaciones*

- ecológicas en un área conflictiva*, INIREB, Cuadernos de Divulgación, núm. 9, Xalapa, pp. 33-41.
- Maderey, L.E., 1967, *Estudio preliminar sobre las aguas subterráneas en México*, Instituto de Geografía, UNAM, México, 75 p.
- Medillín-Leal, F., 1978, "La desertificación, problema de alcance mundial", en F. Medillín-Leal (ed.), *La desertificación en México*, Instituto de Investigaciones de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, SLP, México, pp. 27-32.
- NRC, AIC y ANI (National Research Council, Academia de la Investigación Científica, A.C. y Academia Nacional de Ingeniería, A.C.), 1995, *El suministro de agua de la Ciudad de México. Mejorando la sustentabilidad*, National Academy Press, Washington, 114 p.
- Ramírez, F., 1983, "Situación del Parque Nacional Cofre de Perote, Ver. y su importancia como alternativa de uso de suelo", en Goldberg, A.D. (comp.), *El Cofre de Perote. Investigaciones ecológicas en un área conflictiva*, INIREB, Cuadernos de Divulgación 9, Xalapa, pp. 51-56.
- Reyes, M., 1979, *Geología de la cuenca de Oriental. Estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala*, Departamento de Prehistoria, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Colección Científica Prehistoria 71, México, 62 p.
- Rzedowski, J., 1981, *La vegetación de México*, Limusa, México, 432 p.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), 1987, *Sistema Cutzamala*, Comisión de Aguas del Valle de México, SARH, México, 47 p.
- Sedesol (Secretaría de Desarrollo Social), 1993, *México. Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente 1991-1992*, Instituto Nacional de Ecología, Sedesol, México, 379 p.
- SOSP (Secretaría de Obras y Servicios Públicos), 1982, *Sistema hidráulico del Distrito Federal*, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría de Obras y Servicios del DDF, México, s/p.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984^a, *Carta Geológica, Ciudad de México*, E14-2, esc. 1: 250 000.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984b, *Carta Geológica, Veracruz*, E14-3, esc. 1: 250 000.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984c, *Carta Geológica, Orizaba*, E14-6, esc. 1: 250 000.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984d, *Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, Ciudad de México*, E14-2, esc. 1: 250 000.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984e, *Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, Veracruz*, E14-3, esc. 1: 250 000.

- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984f, *Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, Orizaba*, E14-6, esc. 1: 250 000.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984g, *Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas, Ciudad de México*, E14-2, esc. 1: 250 000.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984h, *Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas, Veracruz*, E14-3, esc. 1: 250 000.
- SPP/INEGI (Secretaría de Programación y Presupuesto/Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1984i, *Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas, Orizaba*, E14-6, esc. 1: 250 000.
- Soria, J., 1987, *Control de la contaminación ambiental producida por centrales termoeléctricas*, Tercer Encuentro Iberoamericano sobre la Ciudad, Jornadas Técnicas sobre el Medio Ambiente, Tecniberia, México, 85 p.
- Toledo, V.M, J. Carabias, C. Toledo y C. González-Pacheco, 1989, *La producción rural en México: alternativas ecológicas*, Prensa de Ciencias, UNAM y Fundación Universo Veintiuno, Colección Medio Ambiente 6, 402 p.
- Vázquez-Yañez C. y A. Orozco, 1989, *La destrucción de la naturaleza*. La Ciencia desde México núm. 83, Secretaría de Educación Pública y Fondo de Cultura Económica, México, 102 p.
- Vilaclara, G., M. Chávez, A. Lugo, H. González y M. Gaytán, 1993, "Comparative description of crater-lakes basic chemistry in Puebla State, Mexico", *Verh. Internat. Verein. Limnol*, 25, pp. 435-440.
- Yañez, C., 1990, *Exploración geotérmica de Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz*, Comisión Federal de Electricidad, Área de Geología y Minería, México.

METALES Y METALOIDES. ESTUDIO DE CASO: CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE ZIMAPÁN, HIDALGO; PROBLEMÁTICA AMBIENTAL Y ENFOQUE METODOLÓGICO

María Aurora Armienta H. y Ramiro Rodríguez C.

INTRODUCCIÓN

La amplia distribución natural de metales y metaloides tóxicos en el ambiente, así como sus múltiples usos, hacen factible su presencia a niveles peligrosos en los diferentes compartimentos ambientales. En México, se han detectado concentraciones mayores a las normas establecidas para el agua potable de metales y metaloides como cromo, arsénico, plomo y manganeso, en diversos acuíferos. La movilidad de estos elementos depende de sus propiedades químicas, de las características hidrogeológicas, de su origen, de la composición química global del agua, así como del tipo de material acuífero. La evaluación de la contaminación debe tomar en cuenta estos factores para poder proponer las soluciones que correspondan a la situación concreta. A continuación se presenta un estudio de caso relativo a uno de los elementos más tóxicos, como un ejemplo de esta problemática en nuestro país.

ANTECEDENTES

Se han encontrado concentraciones elevadas de arsénico en el agua subterránea de diversas regiones de México. Varios de estos acuíferos son utilizados como fuentes de abastecimiento, lo que constituye un problema importante, ya que el consumo de aguas contaminadas con este metaloide ha ocasionado graves problemas de salud en países como Bangladesh, India, Taiwan, Argentina, y Chile (Semdley y Kinniburgh, 2002).

El arsénico se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, es el principal constituyente de más de 200 minerales, entre los más abundantes se encuentran la arsenopirita (FeAsS), el rejalgar (As_4S_4), oropimente (As_2S_3), arse-

nolita (As_2O_3), mimetita ($\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{AsO}_4)_3$) y cobaltita (CoAsS). Además, es un constituyente menor en minerales complejos que se explotan por sus contenidos de cobre, plomo, zinc y plata. El arsénico ha sido utilizado principalmente en la preparación de insecticidas, herbicidas, fungicidas y rodenticidas, aunque algunos de estos usos han sido prohibidos debido a su toxicidad. Este elemento se utiliza también en la industria del vidrio, electrónica, textil, curtiduría, cerámica, en la preservación de la madera, y en la manufactura de cosméticos (Carson *et al.*, 1986; Armienta y Rodríguez, 1995; Thornton, 1996).

El arsénico puede contaminar los acuíferos como resultado de procesos naturales, o bien por un uso o manejo inadecuado de compuestos y residuos que lo contengan. En el agua subterránea se encuentra principalmente como iones negativos de arsénico pentavalente As(V) y trivalente As(III). Ambas especies pueden existir en un amplio rango de pH, pero en condiciones oxidantes predomina el As(V) y en ambientes reductores el As(III). La concentración de arsénico en las aguas naturales está controlada principalmente por interacciones solución-sólido (Smedley y Kinniburgh, 2002). El conocimiento de estas interacciones resulta fundamental para predecir el comportamiento del contaminante en los acuíferos así como para entender los cambios ocurridos en el pasado. En función de las condiciones óxido-reductoras y del pH del agua, el arsénico puede retenerse en diversas superficies minerales como hidróxidos de hierro y aluminio, arcillas y calcita (Sadiq, 1995; Manning y Goldberg, 1997; Sun y Doner, 1998).

Desde hace varios siglos se conoce el carácter tóxico del arsénico. Las exposiciones crónicas se manifiestan en enfermedades cardiovasculares, hepáticas, de la piel, así como en el desarrollo de cáncer. Las lesiones en la piel son los efectos clásicos de este tipo de intoxicaciones. Estas afectaciones consisten principalmente de hiperqueratosis, (engrosamiento de las palmas de las manos y las plantas de los pies), hipopigmentación e hiperpigmentación (Naqvi *et al.*, 1994). El arsenicismo crónico causa también neuritis periférica que afecta principalmente a las extremidades inferiores, así como anemia, leucopenia¹, conjuntivitis, traqueitis, desviaciones del electrocardiograma normal, miocarditis, así como trastornos relacionados con la circulación periférica como la gangrena de extremidades o enfermedad de pies negros. (Gorby, 1994; Morton y Dunnet, 1994). Por otro lado, la carcinogenicidad y toxicidad de este elemento resultan principalmente de la exposición a arsénico trivalente más que a arsénico pentavalente o a compuestos orgánicos de arsénico (Bahmra y Costa, 1992). El arsénico y sus compuestos se introducen al organismo por inhalación (con una eficiencia de absorción de 50%), ingestión (con una eficiencia de absorción de 80%) y vía dérmica (Galvao y Corey, 1987). Se ha estimado en 3 años la latencia del arsenicis-

¹ Disminución del número total de glóbulos blancos en la sangre.

mo y en 24 la del cáncer arsenical (Stöhrer, 1991). Con base en diferentes estudios y evidencias de afectaciones a la salud por el consumo de agua con altas concentraciones de arsénico, la Organización Mundial de la Salud ha propuesto como límite máximo permisible una concentración de 0.010 mg/L en el agua potable. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) adoptó este límite en enero de 2001. En México, la norma NOM-127-SSA1-1994 establecía una concentración máxima de 0.050 mg/L. En el año 2000, la norma fue modificada para disminuir anualmente el límite en 0.005 mg/L de arsénico hasta llegar a 0.025 mg/L en el año 2005 (NOM, 2000). Aunque este último valor es una concentración riesgosa principalmente debido al carácter carcinogénico del arsénico; puede ser cuantificada por muchos laboratorios oficiales. La reducción de este límite a la concentración propuesta por la OMS implicaría mejorar la infraestructura analítica existente. Las poblaciones expuestas a ingesta continua de agua con concentraciones de arsénico superiores a 0.01 mg/L deberían contar con supervisión epidemiológica para detectar posibles afectaciones a la salud.

Los primeros casos de afectaciones a la salud por consumir agua contaminada por arsénico en México, se registraron en La Comarca Lagunera, en los estados de Durango y Coahuila (Cebrián *et al.*, 1983). Aproximadamente 400 000 habitantes de áreas rurales bebieron agua con concentraciones mayores a 0.05 mg/L en esta área (Cebrián *et al.*, 1994). Por otro lado, en un estudio efectuado en 1992 en la misma Comarca, se encontró que 10% de las muestras de leche vacuna colectadas presentaron concentraciones de arsénico mayores a 10 ng/g, que es el nivel máximo en la leche sugerido por la International Dairy Federation (Rosas *et al.*, 1999).

Se ha identificado la presencia de concentraciones elevadas de arsénico en acuíferos de otras regiones del país como en los estados de Durango, Sonora, Zacatecas, Chihuahua y Baja California Sur (figura 1) (Carrillo y Drever, 1998; Waytt *et al.*, 1996; Alarcón *et al.*, 2001; Herrera *et al.*, 2001), y en algunas zonas geotérmicas (Quinto *et al.*, 1995; Birkle *et al.*, 1998). En Acámbaro, Guanajuato, se ha informado la existencia de arsenicismo crónico (Gutiérrez *et al.*, 1996). En Salamanca, Gto. también se han detectado concentraciones sobre la norma (Rodríguez *et al.*, 2002)

Debido a las diversas posibles fuentes de arsénico tanto naturales como antropogénicas, y a su complejo comportamiento ambiental, es indispensable conocer su origen y determinar sus mecanismos de migración en el agua subterránea para dar alternativas viables de solución a los problemas de contaminación de acuíferos.

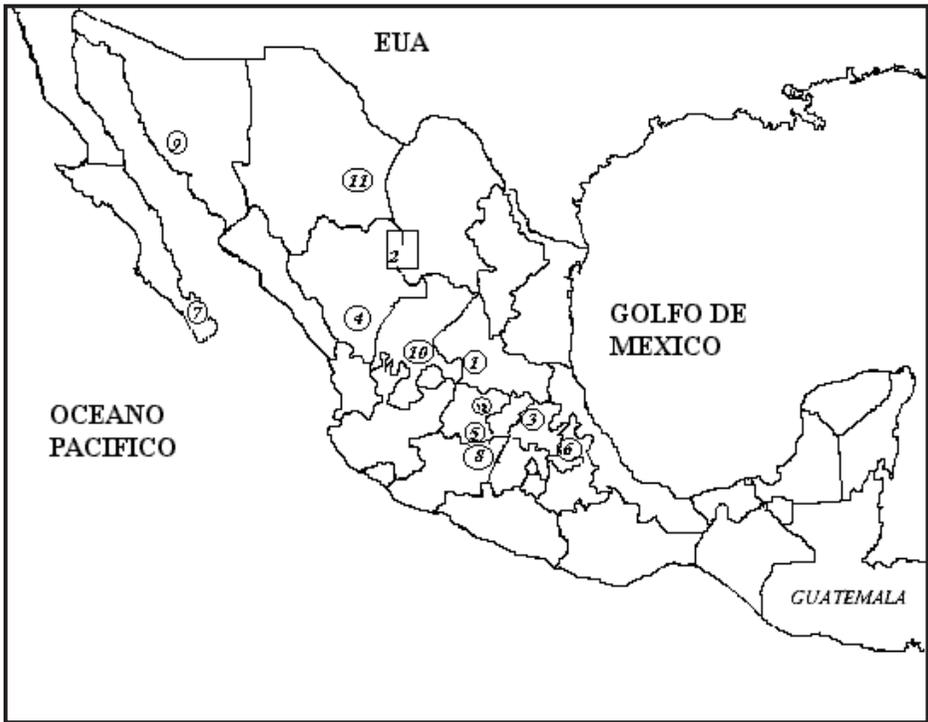


FIGURA 1. Áreas reportadas con concentraciones elevadas de arsénico en el agua subterránea. (1) San Luis Potosí, (2) Comarca Lagunera, (3) Zimapán, (4) Guadiana, (5) Acámbaro, (6) Aocolulco, (7) San Antonio, (8) Los Azufres, (9) Hermosillo, (10) Zacatecas, (11) Delicias, (12) Salamanca.

En 1992, a raíz de la campaña nacional contra el cólera, la CNA detectó la presencia de arsénico en el agua subterránea de Zimapán, Hgo. La información sobre la contaminación del agua potable, circuló de manera informal en el poblado, lo que creó una gran inquietud en los habitantes. Esta situación, y el hecho de que el agua subterránea sea la única fuente de abastecimiento, motivaron a las autoridades municipales a solicitar al Instituto de Geofísica, la realización de un estudio para conocer la realidad de la contaminación por arsénico. Esta investigación multidisciplinaria fue iniciada en 1993, y permitió determinar los niveles, la distribución, los procesos geoquímicos y el origen del arsénico. Paralelamente a estos estudios se han efectuado otros más amplios de tipo ambiental y epidemiológico. Los resultados obtenidos han llevado a proponer alternativas de remediación del agua, basados en diferentes esquemas de tratamiento. Estas investigaciones han sido apoyadas tanto por el municipio de Zimapán como por

otros organismos públicos y privados: la UNAM, la fundación española Mapfre, la National Science Foundation de Estados Unidos y el Conacyt. Los estudios se iniciaron con la participación de investigadores y estudiantes del Instituto de Geofísica; posteriormente se incorporaron profesores y estudiantes de diversas universidades de los Estados Unidos.

EL ARSÉNICO EN ZIMAPÁN

Zimapán, se encuentra ubicado al Este del estado de Hidalgo, su clima es semiárido con una escasa precipitación pluvial. Zimapán ha sido una importante zona minera desde la época colonial. La explotación de los yacimientos de plata, oro, plomo y zinc fue la base de su economía, aunque, por otro lado generó grandes depósitos de residuos (jales, terreros y escorias) resultantes del beneficio de los minerales. El volumen y falta de protección de los jales (residuos del proceso de beneficio de los minerales), así como su ubicación en las orillas del poblado, indicaban a los mismos como el origen de la contaminación por arsénico en el agua. Sin embargo, debido a las características geológicas del área, se planteó que estos residuos podrían constituir solamente una de varias fuentes posibles.

El diseño de la investigación se basó en las características de Zimapán, que comprenden un medio geológico complejo, diversas fuentes posibles de contaminación, y poca información previa sobre la hidrogeología del valle. El estudio comprendió la realización de mediciones piezométricas, nivelación de brocales, reconocimiento geológico y de parámetros estructurales que incluyeron mediciones detalladas de fracturas. Se tomaron muestras de agua y se realizaron determinaciones *in situ* de Eh^2 , temperatura, pH, O_2 disuelto y alcalinidad. En el laboratorio se cuantificaron los iones principales y las concentraciones de arsénico total, As(III), As(V) y otros metales.

La información obtenida permitió estudiar los procesos geoquímicos del arsénico en el agua subterránea y efectuar una modelación de las características hidrogeoquímicas del valle. La información de campo se complementó con experimentos de laboratorio para estudiar los procesos de interacción agua-roca bajo diversas condiciones. La integración de los diversos aspectos de la investigación permitió identificar las fuentes de contaminación del agua subterránea, su grado de afectación, así como la fenomenología que controla la movilidad del arsénico en el flujo subterráneo.

² Potencial de óxido-reducción

GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA

El Valle de Zimapán está situado al este de la Sierra Madre Oriental. La Formación Las Trancas del Jurásico, constituida por lutitas calcáreas interestratificadas con calizas y lutitas laminares, es la más antigua del valle. Las calizas pertenecientes al Banco El Doctor y las Formaciones Tamaulipas y Soyatal representan el Cretácico. El Conglomerado El Morro, del Terciario, sobreyace a la Formación Soyatal. En el Terciario Medio se presentó una intensa actividad ígnea que produjo troncos y diques así como aureolas de metamorfismo formando zonas de skarn en las calizas. El Terciario está también representado por la Formación Las Espinas, constituida por derrames volcánicos de andesitas, basaltos, y aglomerados volcánicos dacíticos y andesíticos. Esta Formación aflora principalmente al este del valle. Las rocas cuaternarias del área están representadas por el Fanglomerado Zimapán y el Fanglomerado Daxhi (Simons y Mapes-Vázquez, 1956; Carrillo-Martínez y Sutter, 1982).

Los efectos compresivos de la Orogenia Laramide afectaron fuertemente la geometría del valle. En las rocas calizas se formaron enormes y complejos pliegues anticlinales y sinclinales asimétricos con orientación preferencial NO-SE y dieron lugar a un sistema de fallas y fracturas.

El Distrito Minero de Zimapán se ha dividido en cuatro zonas mineralizadas (García y Querol, 1988): El Carrizal, El Monte, San Pascual-Santa Gorgonia y la Luz-La Cruz. En el Carrizal se localizan algunas de las minas más productivas. Estructuralmente se identifican yacimientos de reemplazamiento y tipo skarn. En los yacimientos de reemplazamiento la mineralización tuvo lugar después de la deformación de las rocas cretácicas. La mineralización de skarn consiste de mezclas de silicatos de calcio, fierro, magnesio y manganeso con sulfuros que se presentan como diseminaciones. Los sulfuros más abundantes son la esfalerita (ZnS), la galena (PbS) y la piritita (FeS). En estos yacimientos se encuentran diversos minerales que contienen arsénico, principalmente arsenopiritita, escorodita, lolingita, tetrahedrita-tenantita, adamita, mimetita y olivinita. (Simons y Mapes-Vázquez, 1956; García y Querol, 1988; Villaseñor *et al.*, 1996).

EL ARSÉNICO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA

Las características geológicas de la zona definen un sistema acuífero complejo y heterogéneo con una pronunciada variación lateral en su conductividad hidráulica. El fanglomerado Zimapán cubre parcialmente al acuífero más productivo conformado por rocas calizas fracturadas. Ambos tipos de rocas pueden contener minerales de arsénico y estar intrusionados por diques. El fracturamiento tanto

de las calizas como de las rocas volcánicas da lugar a acuíferos “colgados” de pequeñas dimensiones pero que permiten el abastecimiento de pequeñas comunidades mediante norias y manantiales (Armienta *et al.*, 1993).

Los análisis realizados en el agua de norias, pozos y manantiales indicaron concentraciones de As desde inferiores al límite de detección analítico (0.014 mg/L) hasta más de 1.0 mg/L. Las concentraciones fueron mayores a 0.05 mg/L en aproximadamente 34% de las muestras. Los mayores contenidos se encontraron en varios de los pozos profundos. Dos de ellos (El Muhi y Detzaní) se localizan fuera de la influencia de posibles fuentes de contaminación antropogénica. Estos pozos con una profundidad mayor a 150 metros, fueron perforados en las rocas calizas hace más de 20 años y constituían importantes fuentes de agua potable. En enero de 1996, el pozo más contaminado (El Muhi) que también era el más productivo (alrededor de 30 lps) fue clausurado, pero a lo largo de los años se han mantenido otros pozos contaminados (Detzaní, Zimapán Plomo) como fuentes de abastecimiento. La red de agua potable de la mayoría del área urbana, parte de un depósito en el cual se mezclan flujos provenientes de pozos, norias y galerías filtrantes con diversos gastos y grados de contaminación. Cabe señalar que varias localidades del municipio obtienen el agua directamente de norias y pozos. En la figura 2 se presentan los contenidos de arsénico en el agua potable de la zona urbana y pozos profundos utilizados directamente por las comunidades aledañas.

Las norias con mayores concentraciones de arsénico se localizaron en las inmediaciones de los depósitos de jales y antiguas fundidoras (que operaron en Zimapán hasta la década de los 40), con concentraciones hasta 0.53 mg/L (Armienta *et al.*, 1997a). Además, se encontraron similitudes hidrogeoquímicas (aguas de tipo sulfatada-cálcica) entre el agua de norias contaminadas ubicadas a un lado de depósitos de jales (figura 3) y el agua estancada en los mismos, a pesar de que en este tipo de material acuífero se esperaría un tipo de agua bicarbonatada-cálcica. Las norias ubicadas en la zona urbana, sin aparente influencia de contaminación antropogénica mostraron contenidos bajos de arsénico aun que algunos ligeramente mayores a 0.05 mg/L.

La mayoría de los manantiales ubicados tanto en la zona de rocas calizas como en la de volcánicas, no contuvieron arsénico. Varios de ellos se localizaron sobre las fallas Malacate y Muhi. Sus características geoquímicas indicaron que se trata de agua de reciente infiltración.

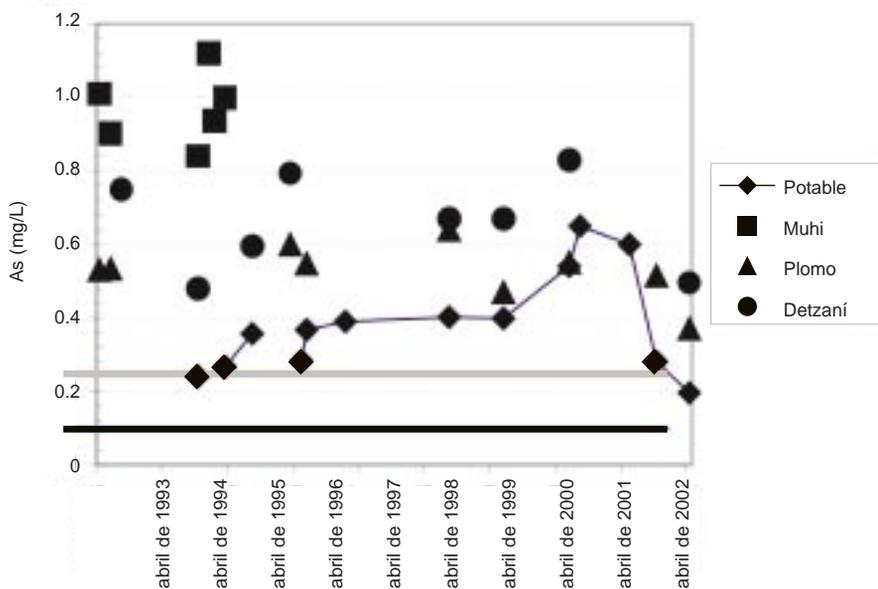


FIGURA 2. Concentraciones de arsénico en el agua potable y pozos profundos en Zimapán. Tanto el agua potable como los pozos contienen As por encima de la concentración recomendada por la Organización Mundial de la Salud, 0.01mg/L (línea azul) y la establecida en México para el 2005, 0.025 mg/L (línea roja).

Los aprovechamientos ubicados en el área de zonas volcánicas al este del Valle de Zimapán, casi no contuvieron arsénico, en su mayoría las concentraciones fueron no detectables. El tipo de agua correspondió a bicarbonatada-mixta, como resultado de la disolución del material volcánico en el que se encuentran. Por otro lado, el agua de los pozos profundos no contaminados se clasificó como bicarbonatada-cálcica, mientras que los pozos contaminados presentaron un enriquecimiento en sulfatos.

Con objeto de definir más claramente la relación entre las fuentes antropogénicas de contaminación (jales y residuos de fundición) y la contaminación de las norias cercanas, se analizaron las concentraciones de arsénico en los mismos residuos y en los suelos aledaños. Se obtuvieron concentraciones totales (con la digestión ácida de las muestras), y solubles (mediante extracción con agua) de arsénico en muestras de la superficie, así como de 30 cm y de 50 cm de profundidad.



FIGURA 3. Depósitos de jales en Zimapán. Al pie de algunos de estos residuos se ubican norias que son utilizadas principalmente para riego. Además, ocasionalmente, durante la época de estiaje, se utilizan como fuentes de abastecimiento de agua para usos domésticos.

Las concentraciones de arsénico en los diferentes depósitos de jales llegaron a 23 000 mg/kg de arsénico total y 13 mg/kg de arsénico soluble. En suelos aledaños se midieron hasta 2600 mg/kg de As total y 8.4 mg/kg de As soluble (Armienta y Rodríguez, 1995). El análisis mineralógico de estos residuos mostró la presencia de arsenopirita. El incremento en los sulfatos en las norias contaminadas indica que se llevan a cabo procesos de oxidación de sulfuros (entre ellos arsenopirita), que permiten también la lixiviación del arsénico. Investigaciones posteriores efectuadas en los distintos depósitos de jales mostraron que ha ocurrido esta liberación, dando como resultado concentraciones altas de arsénico en formas móviles que pueden transportarse fácilmente por las lluvias hasta el agua subterránea (Méndez y Armienta, 2003).

Los suelos ubicados en las cercanías de residuos de fundición, chimeneas y cascos abandonados de fundidoras, también mostraron altas concentraciones de arsénico. Los contenidos variaron entre 26 mg/kg y 4200 mg/kg de arsénico total y entre 1 y 19 mg/kg de arsénico soluble (Armienta y Rodríguez, 1995).

Las concentraciones de arsénico soluble se incrementaron con la profundidad en varios de los sitios. Estos resultados indican que los humos producidos en las fundidoras, enriquecidos en arsénico, se depositaron en el entorno y contaminaron los suelos. La acción de las lluvias y el riego transportaron el arsénico hacia capas más profundas hasta alcanzar el nivel freático.

Por otro lado, la ubicación de los pozos profundos con mayores niveles de arsénico respecto a los residuos antes señalados, así como la dirección general del flujo subterráneo, y su profundidad, indican que el arsénico en los mismos no se relaciona con fuentes antropogénicas. El enriquecimiento en sulfatos puede re-

sultar de procesos de oxidación similares a los observados en los jales. Los minerales de sulfuros como la pirita y arsenopirita al entrar en contacto con el oxígeno del aire se oxidan (figura 4) y liberan sulfatos, Fe y As al agua. Este enriquecimiento en sulfatos se hizo evidente en pozos profundos contaminados. Por ejemplo, el pozo Detzaní (con 0.495 mg/L de arsénico en marzo de 2002) presentó diferencias hidrogeoquímicas respecto al manantial ubicado solamente a 10m del mismo, carente de arsénico, principalmente en los valores de sus respectivas relaciones HCO_3/SO_4 que en el caso del pozo fue de 1.9 y en el del manantial de 11.7 (Armienta *et al.* 1997a). Esto también indicó junto con sus respectivos contenidos de tritio, que se trata de agua procedente de distintos acuíferos. Cabe señalar que el pozo Detzaní seguía en operación hasta agosto de 2002 cuando tuvo problemas con la bomba; mientras que el manantial contiguo carece de agua desde hace más de 2 años.



FIGURA 4. Procesos de oxidación de los sulfuros metálicos. En las zonas rojizas se oxidan y disuelven los sulfuros de hierro y arsénico.



FIGURA 5. Escorias y chimenea de antigua fundidora. Los humos de las fundidoras que operaron en Zimapán contaminaron con arsénico los suelos cercanos. La acción de la lluvia y el riego ha provocado la infiltración de parte de este arsénico hacia el acuífero somero.

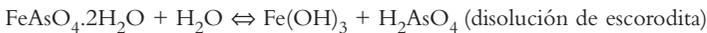
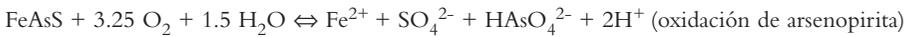
Con objeto de determinar los procesos que naturalmente podrían aportar arsénico al agua, se tomaron muestras de las rocas de cada formación y se determinaron sus contenidos de arsénico. Los rangos de concentración en las rocas colectadas de Las Espinas, Las Trancas y Soyatal fueron mayores que los valores característicos para el tipo de rocas correspondiente. Los mayores contenidos (hasta 360 mg/kg de arsénico) se encontraron en las muestras con evidencias visibles de mineralización de las diferentes formaciones. Se observó la presencia de arsenopirita, escorodita y tenantita en algunas de las rocas.

Al estudiar el comportamiento hidrogeoquímico de los pozos alejados de fuentes antropogénicas de contaminación se observaron menores valores de Eh (ambientes más reductores) en los pozos con mayores concentraciones de arsénico, que mostraron también una mayor temperatura. Algunas norias del área de rocas volcánicas cercanas a pequeñas minas también presentaron contenidos detectables de arsénico. Por otro lado, el pozo de menor caudal (Zim 1) en el acuífero calizo no presentó contaminación. Las características hidrogeoquímicas de este pozo fueron diferentes a las del pozo Zimapán Plomo (con 0.5 mg/L de arsénico) ubicado aproximadamente a 800 m del Zim1 (Armienta *et al.*, 2001). La interpretación de estas diferencias, su ubicación, y sus respectivas litologías reportadas por la CNA (1992), llevó a concluir que el pozo contaminado y con mayor caudal está influido por la falla Malacate que presenta mineralización. El flujo se incrementa debido a la falla pero también facilita la oxidación de los minerales, entre ellos la arsenopirita que libera el arsénico al agua subterránea. Este mismo proceso ha contaminado otros pozos profundos ubicados en las fracturas. La oxi-

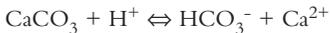
dación de la arsenopirita es un proceso que libera calor y electrones, lo cual también explica las temperaturas más altas y los valores más reductores de los pozos contaminados.

Cuando esta oxidación se produce en medios ácidos, puede formarse escorodita y su disolución es otra de las causas naturales capaz de aportar naturalmente arsénico al agua subterránea. Las características de las rocas y del agua en una cueva con muestras evidentes de oxidación, mostraron el desarrollo de este proceso. En las rocas de esta cueva se identificó la presencia de escorodita, el contenido de arsénico en el agua fue de 0.6 mg/L y en la roca de 10 500 mg/kg, además la concentración de sulfatos fue de 1 454 mg/L con un pH ácido.

Los procesos antes señalados liberan sulfatos y disminuyen el pH de acuerdo a las siguientes reacciones:



Sin embargo la disminución del pH no es tan evidente cuando el agua ha circulado por el acuífero calizo ya que la acidez se neutraliza al reaccionar los iones H^+ con el carbonato de calcio:



La modelación geoquímica inversa de dos pozos localizados en la misma falla indicó la factibilidad de que ambos procesos sean responsables de la presencia de arsénico en los pozos profundos del acuífero calizo.

Las principales conclusiones acerca del origen del arsénico señalaron que las mayores concentraciones de arsénico se producen por procesos naturales de liberación a partir de sus minerales. Estos procesos se producen en zonas mineralizadas dentro de las calizas cretácicas, en especial a lo largo de las fracturas que constituyen a su vez canales preferenciales de circulación del agua subterránea (figura 6). Los resultados obtenidos permiten esperar la presencia natural de arsénico en aguas del tipo bicarbonatada-cálcica con un enriquecimiento en sulfatos. Por otro lado, cabría esperar bajas o nulas concentraciones de arsénico en aguas bicarbonatadas-mixtas.

La infiltración del agua en los depósitos de jales con elevadas concentraciones de arsénico contaminó las norias cercanas a los mismos. El humo emitido por las fundidoras que operaron hasta la década de los 40, enriqueció los suelos con arsénico que posteriormente llegó al acuífero somero. La intemperización de los detritos del fanglomerado Zimapán con presencia local de mineralizaciones, ha contaminado algunas norias con concentraciones mucho menores de arsénico. Los pozos y norias ubicados en el área de rocas volcánicas al este del valle no contienen arsénico, excepto aquellas cercanas a zonas mineralizadas. Sin embargo, estos pozos son poco productivos.



FIGURA 6. Flujo en las fracturas de las calizas. Procesos de oxidación en dique. Los minerales de arsénico se oxidan a profundidad y liberan el arsénico que es transportado por el agua subterránea a través de fallas y fracturas.

PROCESOS DE ELIMINACIÓN DEL ARSÉNICO

Las condiciones hidrogeológicas y el origen y comportamiento del arsénico en el Valle de Zimapán llevaron a proponer a las autoridades, la necesidad de contar con sistemas de tratamiento para eliminar el contaminante del agua. La explotación de pozos ubicados fuera del valle podría ser también otra alternativa que sin embargo, implicaría un mayor costo.

Existen diversos tipos de tratamiento que permiten eliminar el arsénico, por ejemplo ósmosis inversa, adsorción sobre carbón activado, floculación con sales de hierro y aluminio. Debido a la simplicidad y menor costo del tratamiento con sales de hierro, se realizaron experimentos de laboratorio con un sistema físico-químico convencional de floculación-sedimentación-filtración. Se probó la eficiencia de la remoción en el agua del Muhi con diversas cantidades de sulfato férrico y cloruro férrico. Se demostró la viabilidad de este método para disminuir la concentración por debajo del límite establecido para el agua potable (Morales, 1995; Armienta *et al.*, 2003). En otro estudio se encontró que la hematita natural también es capaz de eliminar el arsénico del agua de Zimapán (Simoneova, 1999).

En 1996, se estableció una colaboración entre el Centro de Desarrollo y Aplicaciones Tecnológicas de la Secretaría de Salud y el Laboratorio de Química Analítica del Instituto de Geofísica de la UNAM, para estudiar la viabilidad del uso de las plantas potabilizadoras portátiles tipo CEDAT para la eliminación del arsénico. Los experimentos realizados con agua contaminada artificialmente con las concentraciones encontradas en Zimapán, permitieron determinar el flujo y las cantidades óptimas de reactivos para disminuir la concentración de arsénico hasta los niveles permisibles (Armienta *et al.*, 2001). El proceso de tratamiento se basa en la remoción del arsénico a través de coagulación con sales de hierro. La planta fue desarrollada originalmente para potabilizar agua en situaciones de riesgo en pequeñas comunidades aisladas. Consta de dosificadores para los reactivos, un tanque de coagulación-floculación y 2 tanques de filtración, al final se agrega ozono y cloro para completar la potabilización. El costo de la planta es alrededor de \$200 000.00 y el costo de operación de 20 centavos por m³ de agua tratada. Las pruebas efectuadas añadiendo sulfato férrico como coagulante permitieron calcular un flujo máximo de 50 l/min con recirculación del agua (paso de 2 veces del agua por el sistema) para obtener concentraciones de arsénico inferiores al límite establecido en México para el año 2005.

La propiedad de retención del arsénico por diversos minerales se utilizó para probar otro tratamiento natural con las mismas calizas de la Formación Soyatal. Se estudió su efectividad en el laboratorio y se propuso un esquema de tratamiento casero efectivo consistente en moler las rocas, poner el agua contaminada en contacto con las mismas (2 kg con 20 litros de agua) durante 24 horas y agitarlas lo más frecuentemente posible, para posteriormente filtrarlas a través de una tela (Ongley *et al.*, 2001).

ALTERNATIVAS Y PROBLEMÁTICA SOCIAL

Paralelamente a los estudios del agua subterránea, se efectuaron investigaciones acerca de las posibles afectaciones en la población debidas al consumo del agua contaminada. Se encontraron correlaciones entre contenidos de arsénico en cabello, afectaciones en la piel y concentraciones en el agua consumida (Armienta *et al.*, 1997b). 80% de los 120 individuos estudiados presentaron algún tipo de enfermedad de la piel relacionada al consumo de arsénico. Así mismo, mediante experimentos de laboratorio se determinó el carácter mutágeno del agua con mayores contenidos de arsénico (Gómez-Arroyo *et al.*, 1997).

Debido a que el tipo de afectaciones no ha llegado a ser grave para un porcentaje significativo de personas, la mayoría de los pobladores no ha tomado conciencia del problema de salud que significa ingerir el agua contaminada. Sin embargo, en algunas casas existen norias que se abandonaron a partir de la intro-

ducción del agua potable. Estas norias, que en su mayoría tienen concentraciones de arsénico inferiores a la del agua potable, han vuelto a ser utilizadas por algunos pobladores enterados de la situación. Los estratos con un mayor poder económico al darse cuenta del riesgo, han optado por consumir regularmente agua embotellada que es procesada por varias pequeñas compañías locales.

Los resultados de la investigación relativos a las concentraciones y orígenes del arsénico fueron plasmados en reportes, artículos y tesis. Copias del material escrito se entregaron a las autoridades de Zimapán en diversas ocasiones. Desde el inicio de los estudios a la fecha ha habido 5 presidentes municipales electos, a todos ellos se les informó de la situación y de los avances logrados. En dos ocasiones se hicieron presentaciones ante autoridades de las Comisiones Nacional y Estatal del agua, así como a la Secretaría de Salud. La primera acción desarrollada fue la clausura del pozo con mayores contenidos de arsénico en 1996. Se perforó un pozo en la zona de rocas volcánicas, el cual no contuvo arsénico aunque tiene un bajo caudal. Por otro lado, a pesar de que las investigaciones señalaban las pocas posibilidades de encontrar agua en caudales adecuados sin arsénico, se perforaron alrededor de 5 pozos fallidos. En 1999, la SSA y la CNA donaron dos plantas de tratamiento portátiles tipo CEDAT al municipio, que empezaron a funcionar. Sin embargo, las autoridades municipales en ese tiempo no consideraron operativo mantenerlas en funcionamiento. La Comisión Nacional del Agua ha dado como alternativa la construcción de un acueducto desde Tasquillo hasta Zimapán. Este acueducto deberá bombear el agua desde una distancia de aproximadamente 25 km y elevarla 400 m para llegar a Zimapán. Sin embargo, la población de Tasquillo no ha aceptado la extracción del agua de su municipio y todavía no se ha puesto en operación. A la fecha (febrero de 2003) Zimapán casi no tiene agua, las plantas de tratamiento CEDAT continúan sin funcionar. Debido a problemas en uno de los pozos más productivos (Zimapán Plomo) el agua de abastecimiento se ha surtido últimamente de un pozo que explota el acuífero volcánico, sin embargo su caudal no es suficiente para dotar de agua a la población. Las autoridades municipales actuales acaban de solicitar a la CNA, la instalación de una planta de tratamiento para eliminar el arsénico del pozo El Muhi, con objeto de volverlo a explotar. La exigencia de agua de los pobladores la han cubierto mediante la venta de agua por pipas particulares que la extraen de las norias, la cual no tiene ningún control de calidad químico ni bacteriológico.



FIGURA 7. Vista de una de las estaciones de rebombeo del sistema Tasquillo-Zimapán. Este sistema es una de las alternativas para dotar a Zimapán de agua libre de arsénico.

El suministro de agua a la población de la zona urbana de Zimapán con más de 8 000 habitantes, implica manejar volúmenes de agua superiores a los 1 600 m³ por día. El tratamiento de ese flujo para la eliminación de arsénico requiere de plantas con gastos aproximados de 200 L/s que deben ser supervisadas en forma continua. Este gasto supera al máximo determinado para las plantas tipo CEDAT. Sería necesario considerar el uso de estas plantas de tratamiento para abastecer únicamente de agua para consumo directo a los pobladores. El suministro de garrafones a la población es una alternativa de costo superior ya que involucra toda la infraestructura necesaria para el embotellado y distribución del agua tratada. El acueducto Tasquillo-Zimapán es una alternativa viable que sin embargo, después de 2 años de haberse construido con un costo aproximado de 28 millones de pesos (CNA, 2000), todavía no ha podido iniciar su funcionamiento. El acueducto requiere gastos de mantenimiento menores a los de las plantas de tratamiento y su operación es más sencilla. Por otro lado, el tratamiento casero es muy económico ya que las rocas se encuentran disponibles en el área y pueden ser molidas por cada familia. Sin embargo, es necesaria una campaña masiva de educación para que esta práctica se torne cotidiana. Se requiere además establecer un programa de supervisión periódica para obtener y analizar muestras que permitan comprobar la remoción adecuada del arsénico.

CONSIDERACIONES FINALES

El problema de la contaminación del agua subterránea por metales es endémico en algunas áreas de México. Sin embargo, la intensidad de las afectaciones detectadas a la salud no ha alcanzado los niveles que lo coloquen como un problema prioritario. Se requieren más estudios para evaluar esta contaminación y sus efectos en todo el país. Estos estudios deben abordar e integrar todos los aspectos que influyen en el enriquecimiento del agua con metales y metaloides así como en su dispersión en los acuíferos. Se debe informar a la población sobre los riesgos de consumir agua con concentraciones sobre la norma por periodos relativamente largos de tiempo. Las campañas de información deben ser coordinadas por una sola institución.

La reducción de la concentración de arsénico que llegará hasta 0.025 mg/L en el año 2005 implica que estos niveles se sobrepasarán en varias áreas de México. Es por lo tanto, necesario incrementar los esfuerzos para mejorar la capacidad analítica de los organismos responsables del agua y para dar alternativas viables de solución a esta problemática.

En el caso de Zimapán, el tratamiento del agua forma parte de la solución. Solución que lleva de la mano otras situaciones como el mantenimiento y la disposición final de los lodos enriquecidos en arsénico que generarían las plantas.

BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, H.M.T., M.I. Flores, R.P. Navar, D.I.R. Martín y V.R. Trejo, 2001, "Contenido de arsénico en el agua potable del valle del Guadiana, México", *Ingeniería Hidráulica en México*, XVI, pp. 63-70.
- Armienta Hernández, M.A., G. Villaseñor, R. Rodríguez, L.K. Ongley y H. Mango, 2001, "The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapán Valley, México", *Environ Geol*, 40, pp. 571-581.
- Armienta Hernández, M.A., R. Rodríguez, O. Morton, O. Cruz, N. Cenicerros, A. Aguayo y H. Brust, 2000, "Health risk and sources of arsenic in the potable water of a mining area", *Red Book LAHS*, Inglaterra, pp. 9-16.
- Armienta Hernández, M.A., R. Rodríguez, A. Aguayo, N. Cenicerros, G. Villaseñor y O. Cruz, 1997a, "Arsenic contamination of groundwater at Zimapán, México", *Hydrogeology J.*, 5, pp. 39-46.
- Armienta Hernández, M.A., R. Rodríguez, G. Villaseñor, A. Aguayo, N.E. Cenicerros, F. Juárez y T. Méndez, 1993, "Estudio de Reconocimiento de la Contaminación por Arsénico en la Zona de Zimapán, Hidalgo", en *Informe Técnico II, Informe del IGF al Municipio de Zimapán, Hgo.*, noviembre 1993.

- Armienta Hernández, M.A., R. Rodríguez y O. Cruz, 1997b, "Arsenic content in hair of people exposed to natural arsenic polluted groundwater at Zimapán, México", *Bull Environ Contam Toxicol*, 59, pp. 583-589.
- Armienta Hernández, M.A. y R. Rodríguez Castillo, 1995, "Evaluación del Riesgo Ambiental Debido a la Presencia de Arsénico en Zimapán, Hidalgo", en *Memoria Final Fundación MAFRE*, I.G.F., UNAM, México.
- Bahmra, R.K. y M. Costa, 1992, "Trace Elements Aluminium, Arsenic, Cadmium, Mercury and Nickel", en Lippman, M. (ed.), *Environmental Toxicants: human exposure and their health effects*, Van Nostrand Reinhold, N.Y., pp. 575-631.
- Birkle, P., B. Merkel, V. Torres-Rodríguez y E. González-Partida, 1998, "Efectos ambientales por la descarga de salmueras en el campo geotérmico de Los Azufres, México", en *Resúmenes, 1a Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra*, México, 127 p.
- Carrillo, A., J.I. Drever, 1998, "Environmental assessment of the potential for arsenic leaching into groundwater from mine wastes in Baja California Sur, Mexico", *Geofísica Internacional*, 37, pp. 35-39.
- Carrillo-Martínez, M. y M. Sutter, 1982, "Tectónica de los alrededores de Zimapán, Hidalgo y Querétaro", en *Libro Guía de la Excursión Geológica a la región de Zimapán y áreas circundantes, estados de Hidalgo y Querétaro*, 6, Conv. Nal. Soc. Geol. Mex.
- Carson, B.L., H.V. Elis III y J.L. McCann, 1986, "Toxicology and Biological Monitoring of Metals in Humans", *Lewis Publishers Inc.*, pp. 27-33, Chelsea.
- Cebrián, M.E., A. Albores, G. García-Vargas, L.M. Del Razo y P. Ostrosky-Wegman, 1994, "Chronic arsenic poisoning in humans: the case of Mexico", en *Arsenic in the Environment, Part II: Human Health and Ecosystem Effects*, en Nriagu, J.O. (ed.), John Wiley & Sons, Inc., pp. 93-107.
- Cebrián, M.E., A. Albores, M. Aguilar y E. Blakely, 1983, "Chronic arsenic poisoning in the north of Mexico", *Human Toxicol*, 2, pp. 121-133.
- CNA, 1992, *Informe Preliminar del estudio hidrogeoquímico en la zona de Zimapán, Hidalgo*, Comisión Nacional del Agua. Reporte Interno COA-2/1992.
- CNA, 2000, *Proyecto Zimapán*, Gerencia Estatal en Hidalgo, Comisión Nacional del Agua, abril.
- Galvao, L.A.C. y G. Corey, 1987, *Arsénico*, Serie Vigilancia 3, Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, OMS, Metepec, México.
- García, S. y S.F. Querol, 1988, Descripción de algunos yacimientos del distrito de Zimapán, Hidalgo", en Salas, G.P. (ed.), *Geología Económica de México*, Fondo de Cultura Económica, México, pp. 383-400.
- Gómez-Arroyo, S., M.A. Armienta, J. Cortés-Eslava y R. Villalobos-Pietrini, 1997, "Sister chromatid exchanges in *Vicia faba* induced by arsenic-contaminated drinking water from Zimapán, Hidalgo, México", *Mutation Research*, 394, pp. 1-7.

- Gorby, M.S., 1994, "Arsenic in human medicine", en Nriagu, J.O. (ed.), *Arsenic in the Environment*, Part II: *Human Health and Ecosystem Effects*, John Wiley & Sons, Inc, NY, pp. 1-16.
- Gutiérrez, P.A., R.E. Rodríguez, G. Romero y G.A. Velázquez, 1996, "Eliminación de arsénico en agua potable de pozos", en *Actas INAGEQ 2*, pp. 319-332.
- Herrera, M.T.A., I.F. Montenegro, P.R. Navar, I.R.M. Domínguez y R.T. Vázquez, 2001, "Arsenic content of the drinking water sources for the Guadiana Valley, México", *Ingeniería Hidráulica en México*, 16, pp. 63-70.
- Manning, B.A. y N. Goldberg, 1997, "Adsorption and stability of arsenic (III) at the clay mineral-water interface", *Environmental Science and Technology*, 31 (7), pp. 2005-2011.
- Méndez, M. y M.A. Armienta, 2003, "Arsenic Phase Distribution in Zimapán Mine Tailings, México", *Geofísica Internacional*, 42, pp. 131-140.
- Morales, C.F., 1995, *Coagulación con Sales de Hierro y su Eficiencia en la Remoción de Arsénico del Agua Subterránea Destinada al Consumo Humano en Zimapán, Hgo.*, Proyecto Terminal en Ingeniería Ambiental, UAM Azcapotzalco, febrero.
- Morton, W.E. y D.A. Dunnette, 1994, "Health effects of environmental arsenic", en Nriagu, J.O. (ed.), *Arsenic in the Environment*, Part II: *Human Health and Ecosystem Effects*, John Wiley & Sons, Inc, NY, pp. 17-34.
- Naqvi, S.M., Ch. Vaishnavi y H. Singh, 1994, "Toxicity and metabolism of arsenic in vertebrates", en Nriagu, J.O. (ed.), *Arsenic in the Environment*, Part II: *Human Health and Ecosystem Effects*, John Wiley & Sons, Inc, NY, pp. 55-91.
- NOM, 2000, Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental. agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización", *Diario Oficial de la Federación*, octubre 20, pp. 1-8.
- Ongley, L.K., M.A. Armienta, K. Heggeman, A.S. Lathrop, H. Mango, W. Miller y S. Pickelner, 2001, "Arsenic removal from contaminated water by the Soyatal Formation, Zimapán District, Mexico a potential low-cost low-tech remediation system", *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 1, pp. 23-31.
- Quinto, A., E. Santoyo, E. Torres, E. González y D. Castillo, 1995, "Estudio geoquímico-ambiental de los efluentes naturales producidos en la zona geotérmica de Acozulco, Puebla", *Ingeniería Hidráulica en México*, X, pp. 21-27.
- Rodríguez, R., A. Armienta, J. Berlin y J.A. Mejía, 2002, "As and Pb groundwater pollution of the Salamanca Aquifer system. Origin, mobilization and restoration alternatives", *Red Book LAHS*, pp. 561-565, Inglaterra.
- Rosas, I., R. Belmont, A. Armienta y A. Baez, 1999, "Arsenic concentrations in water, soil, milk and forage in Comarca Lagunera, Mexico", *Water, Air and Soil Pollution*, 112, pp. 133-149.
- Sadiq, M., 1995, "Arsenic Chemistry in soils: an overview of thermodynamic predictions and field observations", *Water, Air and Soil Pollution*, 93, pp. 117-136.
- Simoneova, V.P., 1999, "Estudio piloto para remoción del arsénico, Estado de Hidalgo, México", *Ingeniería Hidráulica en México*, XIV, pp. 65-77.

- Simons, F.S. y E. Mapes-Vázquez, 1956, *Geology and ore deposits of the Zimapán mining district, State of Hidalgo, Mexico*, USGS Prof Paper, 284 p.
- Smedley, P.L. y D.G. Kinniburgh, 2002, "A Review of the Source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters", *Applied Geochemistry*, 17, pp. 517-568.
- Stöhrer, G., 1991, "Arsenic: opportunity for risk assessment", *Arch Toxicol.*, 65, pp. 525-531.
- Sun, X. y H.E. Doner, 1998, "Adsorption and oxidation of arsenite on goethite", *Soil Science*, 163, pp. 278-287.
- Thornton, I., 1996, "Sources and Pathways of arsenic in the geochemical environment: health implications", en Appleton, J.D., R. Fuge y G.J.H. McCall (eds.), *Environmental geochemistry and Health*, Geological Society Special Publ., 113, pp. 153-161.
- Villaseñor, C.M.G., E.U. Petersen, S. Avendaño-Cano S., J.A. Gómez-Caballero, J. Sousa y A.M. Reyes-Salas, 1996, "Minerales del grupo de la tetrahedrita en las minas de Lomo de Toro y Las Ánimas, Zimapán, Hidalgo", *Actas INAGEQ* 2, pp. 129-134.
- Wyatt, J.C., C. Fimbres, L. Romo, R.O. Méndez y M. Grijalva, 1996, "Incidence of Heavy Metal Contamination in Water Supplies in Northern Mexico", *Environ Res*, A76, pp. 114-119.

DESECACIÓN DE LOS LAGOS CRÁTER DEL VALLE DE SANTIAGO, GUANAJUATO

Óscar A. Escolero F. y Javier Alcocer D.

El Valle de Santiago constituye una de las regiones más simbólicas del Altiplano Mexicano debido a la presencia de siete conos volcánicos dispuestos en el terreno de tal manera que asemejan al acomodo de las siete estrellas de la Osa Mayor; también denominado la región de “Las siete luminarias” en la época de la colonia, haciendo referencia a los siete volcanes activos que iluminaban la zona en el pasado.

Ubicados en una de las cuencas más contaminadas y sobrexplotadas de México, la del río Lerma-Santiago, los lagos cráter de Valle de Santiago son un claro ejemplo de la dramática situación por la que atraviesan los recursos acuáticos continentales mexicanos, en especial aquellos ubicados en las regiones áridas y semiáridas que constituyen dos terceras partes del país.

Los lugareños nombran a estos cráteres como “hoyas” o “joyas”, lo cual es, al parecer, un error lingüístico derivado de la pronunciación similar de la palabra “hoyo”. A pesar de existir alrededor de 30 cráteres volcánicos en el área, las siete hoyas son, de norte a sur, Hoya Rincón de Parangueo, Hoya San Nicolás de Parangueo (también San Nicolás Parangueo o San Nicolás), Hoya Estrada, Hoya La Alberca, Hoya Blanca, Hoya Cíntora (Zíntora o La Cintura) y Hoya Álvarez. El fondo de al menos cuatro de estos cráteres fue suficientemente profundo para alcanzar el manto freático de la región, dando origen a lagos cráter (Maars); estos son: Rincón de Parangueo, San Nicolás de Parangueo, La Alberca y Cíntora.

La mayoría de los lagos mexicanos se encuentran en un estado avanzado de desecación o senescencia, con sus áreas superficiales y volúmenes altamente reducidos. La deforestación, desviación de efluentes para la agricultura, la sobrextracción de aguas subterráneas, la contaminación y la eutrofización son tan sólo algunas de las causas antropogénicas de este proceso de deterioro. Los procesos naturales, geológicos y climáticos, también han venido favoreciendo la desecación de nuestros lagos (Alcocer y Escobar, 1996).

LOCALIZACIÓN

Los lagos cráter de Valle de Santiago se encuentran ubicados en la porción sur del estado de Guanajuato, muy cerca de su colindancia con el Estado de Michoacán. Rincón de Parangueo se encuentra a $20^{\circ}25'N-101^{\circ}15'W$ y 1700 m s.n.m., San Nicolás de Parangueo a $20^{\circ}23'N-101^{\circ}15'W$ y 1700 m s.n.m., La Alberca a $20^{\circ}23'N-101^{\circ}12'W$ y 1690 m s.n.m. y, finalmente, Cántora a $20^{\circ}21'N-101^{\circ}12'W$ y 1710 m s.n.m. (Cetenal, 1971).

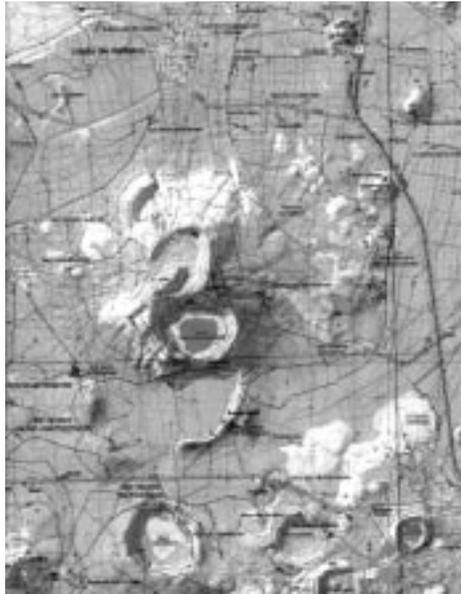


FIGURA 1. Localización de los lagos cráter del Valle de Santiago, Guanajuato.

POBLACIÓN

Las principales ciudades que se encuentran en este acuífero son: Jaral del Progreso con 16 060 habitantes y Valle de Santiago con 56 517; información correspondiente al Censo Definitivo de Población de 1995 del INEGI.

CLIMA

La temperatura media anual de la región fluctúa entre 18 y $20^{\circ}C$ y la precipitación media anual oscila, entre 600 y 800 mm. Existen dos estaciones meteorológicas

lógicas ubicadas en el pueblo de Valle de Santiago, muy cercanas a La Alberca. Los parámetros climatológicos que éstas registran son: temperatura media anual de 19.2 a 20.5°C, precipitación media anual entre 715 y 738 mm, la máxima precipitación anual es de 963 a 1 193 mm, mientras que la mínima es de 369 a 452 mm (SPP, 1981a), la evaporación potencial es de 1 935 m al año.

HIDROLOGÍA

El área donde se encuentran los lagos pertenece a la Región Hidrológica Lerma-Santiago (RH12), cuenca del río Lerma-Salamanca (B), subcuenca de Presa de Solís-Salamanca (figura 1). A pesar de que el acuífero regional, fuente principal de abastecimiento para los lagos, ha sido vedado a la extracción de agua subterránea, existen numerosos pozos al norte, este y oeste de la cuenca (SPP, 1980). En este valle se ubican los módulos 3 Jaral del Progreso y 4 Valle de Santiago, del Distrito de Riego 11 “Alto Río Lerma”, y 154 Unidades de riego con 171 obras (pozos).

FISIOGRAFÍA

De acuerdo con la clasificación de INEGI el área de estudio se localiza dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, cubre una parte de la subprovincia de Sierras y Bajíos Michoacanos y parte de la subprovincia del Bajío Guanajuatense. La subprovincia de Sierras y Bajíos Michoacanos se caracteriza por tener sierras con cráteres y llanuras de bajíos aislados; la subprovincia del Bajío Guanajuatense se caracteriza por la presencia de sierras de laderas tendidas, mesetas con cañadas, lomeríos aislados y llanuras de aluviones profundos. Las elevaciones del terreno en esta subprovincia oscilan entre 1 750 y 2 100 msnm.

GEOMORFOLOGÍA

La formación del relieve en el área de estudio ha sido generada por diferentes ciclos evolutivos, destacando en ellos el vulcanismo el cual es de cierta intensidad y la erosión, tanto eólica como hidráulica.

Relieve endógeno

Relieve volcánico acumulativo. Esta clase se enfoca a la descripción del relieve formado por el vulcanismo plio-cuaternario, el cual por su relativa juventud se en-

cuentra muy poco alterado por los procesos exógenos; en el área existen los siguientes tipos:

Derrames y mesas de lava. Esencialmente basálticas al Norte y basáltico-andesítico al Sur. El grado de conservación de estas rocas es alto en tanto representa las fases más recientes del vulcanismo del centro de México. Ello se traduce en bajos valores de densidad y profundidad de la disección. Estos relieves se localizan en Valle de Santiago y zonas adyacentes. Allí se encuentra la mayor concentración de estructuras volcánicas monogenéticas cuyas erupciones han modificado la hidrología preexistente. En esta zona destacan cráteres de explosión (Maars), conocidos como Hoyas. Estos Maars y demás aparatos volcánicos se asientan sobre la planicie del Lerma con altitudes relativas de 500 a 700 m sobre la misma. Existe una gran extensión de lavas, algunas formando laderas radiales, con pendientes de 12° a 15°, también existen otras inclinaciones no más de 4° a 5°, tratándose de derrames extendidos sobre la planicie.

Relieve acumulativo

Planicies y terrazas fluviales y lacustres no diferenciadas. Corresponde a la planicie regional conocida como el Bajío con latitudes de 1 700 a 2 000 msnm, se trata de acumulaciones de diversos materiales fluviales de granulometría fina (arena, limos, arcillas) y materiales piroclásticos (esencialmente cenizas) depositados en facies lacustres. Representan los depósitos de los antiguos lagos del cuaternario originados en una época de balance hídrico favorable, que posteriormente fueron afectados por emanaciones volcánicas, cambios climáticos, y lentamente fueron desecándose y drenando hacia el oeste, a través del antiguo Lerma.

Estas planicies se originaron por la tectónica plio-cuaternaria, también responsable del vulcanismo del Eje Neovolcánico.

Superficie de piedemonte esencialmente deluviales con disección débil. Abarca los abanicos aluviales cuaternarios, constituidos por conglomerados y areniscas, y en las partes frontales, más finos. Se presentan al pie de los conjuntos montañosos en contacto con la planicie de nivel de base sobre el cual se produce el “derrame”.

GEOLOGÍA

La zona de estudio se encuentra en un amplio valle en el cual las unidades observadas en superficie son principalmente productos volcánicos del Terciario y Cuaternario; sin embargo, en el subsuelo se encuentran secuencias de materiales diversos reportando edades desde el Mesozoico hasta el reciente.

La secuencia de las unidades litológicas se presenta como sigue:

Mesozoico

Esta era está representada por secuencias metamórficas, complejos intrusivos, depósitos vulcano-sedimentarios marinos y secuencias sedimentarias marinas. La secuencia se encuentra afectada por pliegues y cabalgaduras desarrollados a partir del inicio del Cretácico Tardío que fueron acompañados por un levantamiento general y emersión de la región, procesos que fueron migrando gradualmente hacia el este. Secuencia vulcanosedimentaria (Triásico-Jurásico).

Piroxenita San Juan de Otates

Se reporta para este periodo un complejo plutónico denominado Piroxenita San Juan de Otates se le localiza aflorando en la Sierra de León, al Noroeste de la Ciudad de Irapuato, fuera de la zona de estudio, sobre el Arroyo San Juan de Otates.

Secuencia vulcanosedimentaria (Jurásico Superior-Cretácico)

Este sistema está constituido por dos elementos, en la base se encuentran secuencias de lavas almohadilladas, intercaladas con rocas piroclásticas ácidas y básicas, que sobreyacen a la Formación La Esperanza.

A estas lavas se les identifica como Formación La Luz, descrita como una secuencia de lavas almohadilladas y lavas masivas de composición basalto-andesíticas, que en la cima presenta secuencias interestratificadas de materiales sedimentarios compuestos por rocas calcareoarcillosas con intercalaciones de pedernal. Estas secuencias afloran en la carretera que conduce del Cerro El Cubilete al Mineral de La Luz, el espesor aproximado de esta unidad es de 1 000 m. La edad se determinó basándose en estudios micropaleontológicos relacionando la microfauna observada con registros de edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior y por estudios radiométricos de los basaltos, los cuales reportan una edad de 108.4 ± 2 millones de años, con lo que se confirma una edad Cretácica.

Complejo vulcanosedimentario Sierra de Guanajuato

Nombre informal asignado para describir a una secuencia de facies sedimentarias y volcánicas marinas, que afloran en la Sierra de Guanajuato. Se divide en dos componentes con marcadas diferencias litológicas, la componente sedimentaria agrupa las siguientes rocas: calizas y lutitas en estratos delgados, areniscas de color verde con estratificación gradada, presentando fragmentos líticos de origen pélico, fragmentos ígneos y escasos fragmentos de rocas calizas y pedernal y en algunas porciones se observan conglomerados de color verde, con clastos de diverso origen.

Cenozoico

En el Cenozoico la sobreposición de las unidades geológicas está íntimamente relacionada con los procesos orogénicos y el emplazamiento de los dos grandes arcos volcánicos que afectaron al centro del país.

Terciario

Conglomerado Guanajuato

Con este nombre se agrupa a una secuencia de sedimentos clásticos continentales, localizada en las cercanías de la Ciudad de Guanajuato, que está ampliamente distribuida en la Sierra de Guanajuato, se relaciona como pertenecientes a esta unidad a los afloramientos conglomeráticos localizados en La Sierra de León, que otros autores denominaron informalmente como Conglomerado Duarte.

Esta unidad no aflora en la zona de estudio, pero por su amplia distribución en la región es posible que se encuentre a profundidad cubierta por los materiales volcanosedimentarios más recientes, es una unidad que ha mostrado baja permeabilidad por lo que esta puede ser considerada impermeable.

Andesita Bernalejo

Con este nombre se designa a un afloramiento de rocas andesíticas en las cercanías del poblado de Bernalejo. El espesor de la unidad no se ha determinado, y se considera que está en contacto discordante con las unidades intrusivas al poniente de San Francisco del Rincón, y le sobreyacen unidades ignimbríticas. La edad de esta unidad es Oligoceno Temprano, y se le asigna tomando en cuenta su posición estratigráfica.

Ignimbrita Cuatralba

Se agrupa bajo este nombre a todo el material volcánico de naturaleza piroclástica localizados en las mesetas de la Sierra de Guanajuato, es ampliamente distribuida en el territorio del estado. Se la divide informalmente en dos miembros, el miembro inferior que se compone de una toba masiva, presentando un color que varía de café claro a crema, es poco consolidada, y los materiales predominantes son cenizas, con escasos fragmentos líticos y pómez, sin colapsar.

Conglomerado Xoconostle

El nombre de conglomerado Xoconostle fue adoptado para describir a las rocas conglomeráticas producto de la erosión de las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental.

No aflora en el área de estudio, pero al norte aflora en los alrededores de la Sierra de Guanajuato, y está constituido por clastos gruesos de ignimbritas y en menor proporción de fragmentos andesíticos, además de horizontes de rocas are-

niscas alternando con limolitas pobremente cementadas, interestratificadas con capas de conglomerado.

Secuencia Volcánica del Mioceno Tardío

Agrupada a una serie de rocas volcánicas básicas e intermedias y algunas veces riolíticas, esta secuencia tiene un dominio regional localizándose afloramientos en las inmediaciones de la Ciudad de Querétaro, aunque es posible que se asocien afloramientos desde el Estado de Jalisco hasta el Estado de Querétaro. Estos productos volcánicos definen en conjunto un arco volcánico con un rumbo general E-W, y se distinguen como la base del Eje Neovolcánico.

Cuaternario

Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato

Este campo cuenta con aproximadamente 900 conos cineríticos y 100 volcanes de otros tipos, tales como conos, domos y gruesos derrames de lava no asociados, conos y mares, además de estos se han reportado 300 volcanes de tamaño medio (formando algunos un escudo de aproximadamente 10 Km. de diámetro), abarcando una superficie de aproximadamente 40 000 km².

Las unidades que se distinguen dentro del campo son las siguientes: Conos Cineríticos Villa Escalante (fuera del área de estudio), Volcanes de Escudo y Pequeños Conos de Lava (PV1), Domos Andesíticos Pátzcuaro (fuera del área de estudio), Domos del Pleistoceno (Domos Riolíticas y Dacíticos El Oro), Domos Riolíticas y Dacíticos Puruandiro (fuera del área de estudio) y Volcanes Monogenéticos (PV3).

Conos Cineríticos Villa Escalante

Ésta es una unidad constituida por volcanes altamente degradados morfológicamente, que se localiza en la región de Villa Escalante, Michoacán y en la Depresión Salamanca-Querétaro. Esta Unidad se compone de derrames de lavas asociados a los conos cineríticos, donde se reportan abundantes conos con derrames de basalto de olivino, calcialcalinos y andesitas basálticas.

Volcanes de Escudo y Pequeños Conos de Lava

Esta unidad presenta una variedad de rocas ígneas extrusivas, en que predominan los conos andesíticos, mientras que en los volcanes de escudo se reportan lavas menos evolucionadas, reportando lavas andesíticas calcialcalinas, que muestran un rango limitado de SiO₂, con ocurrencia común de fenocristales de ortopiroxeno.

La edad en esta unidad de acuerdo con las anotaciones realizadas en muestras de esta unidad, se establece un rango limitado entre 1.3 y 0.83 millones de años, colocando a estas rocas en el Pleistoceno Tardío-Holoceno.

Vólcanes Monogenéticos

La continuación de la actividad volcánica ubica a esta unidad como la unidad volcánica más joven en el Eje Neovolcánico, representada por efusiones de productos básicos e intermedios, se distingue la presencia de siete Maars alineados en dirección NNW, cercanos al poblado Valle de Santiago, en la Depresión Salamanca-Querétaro.

La litología de esta unidad se compone principalmente de basaltos y andesitas con la formación de montículos de brechas basálticas en los conos cineríticos y algunos flujos de lavas andesítico-basálticas.

Aluvión

Esta unidad agrupa a todos los depósitos originados a partir de la erosión e intemperismo de las rocas que afloran en las porciones altas en la región.

La zona de exposición de esta unidad es muy amplia localizándose en las partes bajas de los valles, desde la región Celaya-Salamanca-Irapuato, el espesor es muy variable, haciéndose más delgado en la zona de Salamanca e Irapuato respecto a la zona de Celaya.

Existe gran variación en la composición de esta unidad y su granulometría abarca desde sedimentos finos como son limos y arcillas, hasta las arenas mal clasificadas, desde finas a gruesas, y algunos fragmentos del orden de las gravas, también se encuentran los suelos residuales.

VEGETACIÓN

En cuanto a vegetación terrestre se refiere, las pendientes internas del cráter de Rincón de Parangueo están cubiertas por matorrales, cardos y cactus (*Opuntia* spp.). Los terrenos que rodean el lago de San Nicolás de Parangueo están siendo cultivados; sin embargo, la vegetación de las paredes del cráter es similar a la anterior (matorrales, cardos y cactus). Esta situación se invierte en el caso de Cíntora, en donde la zona cultivada se encuentra en las pendientes del cráter, mientras que los matorrales, cardos y cactus rodean al lago. En las paredes interiores de La Alberca crecen pastizales naturales, matorrales y cactus.

En lo referente a la vegetación de la cuenca, ésta ha sido totalmente modificada y transformada para la agricultura tanto de temporal como de riego. Extensas zonas antiguamente cubiertas por bosque de pino y encino (*Pinus* y *Quercus*) han sido totalmente deforestadas y convertidas en regiones agrícolas, una de las actividades más importantes en la actualidad de la región.

MORFOMETRÍA DE LOS LAGOS

La forma de los lagos varía desde circular-elíptica (La Alberca y Cíntora), hasta ligeramente triangular (Rincón de Parangueo y San Nicolás de Parangueo). Esta forma es común a los lagos Maars (Wetzel, 2001). Existe muy poca información morfométrica referente a los lagos cráter de Valle de Santiago; entre ella se encuentra la de Green (1986) y algunos datos de Orozco y Madinaveitia (1941). Los principales parámetros morfométricos se presentan a continuación (tabla 1).

TABLA 1
PRINCIPALES PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LOS LAGOS CRÁTER
DE VALLE DE SANTIAGO, GUANAJUATO

	<i>Rincón de Parangueo</i>	<i>San Nicolás</i>	<i>Cíntora</i>	<i>La Alberca</i>
A	724 000 ^a	491 211 ^b	267 188 ^b	181 000 ^a
(m ²)	686 719 ^b			146 875 ^b
l (m)	1050 W-E ^b	969 N-S ^b	619 N-S ^b	481 W-E ^b
b (m)	913 N-S ^b	688 W-E ^b	575 W-E ^b	394 N-S ^b
z _{MAX}	2.0 ^a			50 ^a
(m)	7.5 ^b	?	?	10 ^b
< 0.5 ^c			0.05 ^c	
V (m ³)	?	?	?	1,000,000 ^d

(A = área superficial, l = longitud máxima b = ancho máximo, z_{MAX} = profundidad máxima, V = volumen.). [? = desconocido, a = Green (1986), b = datos obtenidos por los autores en 1995, c = datos obtenidos por los autores en 2002, d = Orozco y Madinaveitia (1941)].

Green (1986) indica profundidades máximas para La Alberca y Rincón de Parangueo de 50 m y 2 m, respectivamente. Sin embargo, este autor no midió directamente la profundidad (se lo comunicaron los locales) lo cual explica, al menos para el caso de Rincón de Parangueo, la diferencia encontrada. La Alberca ha sufrido un proceso de desecación importante. De acuerdo con las marcas de la antigua línea de costa, por lo menos se ha reducido en unos 25-30 m, lo cual hace pensar que antiguamente el lago alcanzaba alrededor de los 50 m de profundidad. Rojas (1985) menciona que la profundidad de La Alberca era de 34.4 m en las orillas y de 35.9 m al centro. Esto indicaría una reducción de 26 m en diez años; suponiendo un proceso de desecación constante sería una reducción de 2.6 m por año. Para el año 2003, tanto La Alberca como Rincón de Parangueo se encontraron secos, justo antes del inicio de la época de lluvias. Alcocer (2002) presente, evidencia fotográfica en donde ilustra el drástico cambio de nivel de ambos lagos en los últimos años.

Orozco y Madinaveitia (1941) mencionan que, a pesar de la elevada tasa de evaporación prevaleciente, La Alberca mantenía su nivel constante a través de las

temporadas de secas y de lluvias gracias a diversos manantiales termales (24°C) que alimentaban el lago. Sin embargo, ni Green (1986) ni nosotros encontramos dichos manantiales ni sus restos. Incluso los habitantes de la zona no recuerdan la existencia de manantiales en el cráter de La Alberca. Seguramente la sobreex-tracción de agua subterránea es la razón principal por la cual La Alberca ha visto disminuido su nivel.

Revisando las fotografías aéreas de la zona, se determinó que en 1970 (las más antiguas disponibles) los cuatro lagos tenían agua. Sin embargo, en las fotografías del siguiente vuelo que se realizó catorce años después (1984), tanto San Nicolás de Parangueo como Cíntora se encontraban secos. Brown (1984 citado por Metcalfe *et al.*, 1994) menciona que el primero de ellos, San Nicolás de Parangueo, se secó aproximadamente en 1979.

SALINIDAD DEL AGUA DE LOS LAGOS

No existen bases de datos antiguas respecto a la condición de salinidad de los lagos pero, de acuerdo con los lugareños, los cuatro lagos cráter diferían en salinidad, siendo Rincón de Parangueo y Cíntora los más salinos de ellos. Green (1986) menciona 2.3 mS.cm^{-1} de conductividad (K_{20}) para las aguas de La Alberca y 25 mS.cm^{-1} para Rincón de Parangueo. Para 1995 la conductividad (K_{25}) era de $5\text{--}6 \text{ mS.cm}^{-1}$ ($\approx 3\text{--}3.5 \text{ g.l}^{-1}$) y de 70 a 80 mS.cm^{-1} ($\approx 53\text{--}56 \text{ g.l}^{-1}$) para La Alberca y Rincón de Parangueo, respectivamente. Para el 2002, con los lagos casi secos, la salinidad sobrepasó los 120 g.l^{-1} en Rincón de Parangueo. Se ha presentado un incremento en la salinidad a lo largo del tiempo, lo cual indica que, además de la desecación por sobreex-tracción del agua del manto freático, ha existido un proceso de evaporación importante en los lagos con la consecuente concentración.

COMPOSICIÓN IÓNICA DEL AGUA DE LOS LAGOS

Del único lago que existe información sobre la composición química de sus aguas es La Alberca. Las características químicas del agua se presentan a continuación (tabla 2).

TABLA 2
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL MANANTIAL
Y DEL LAGO CRÁTER DE LA ALBERCA

Ion (mg/L)	La Alberca		
	Manantial (1941) ¹	Lago cráter	
		(1941) ¹	(1981) ²
Na	102.2	2 932.5	447.8
K	ND	ND	87.7
Ca	0*	0*	6.0
Mg	0*	0*	70.1
SO ₄	8.11	412.4	73.0
Cl	20.7	503.8	173.9
HCO ₃	225.1	2 127.2	811.3
CO ₃	0	2 094.2	204.0
NO ₃	ND	ND	1.2

ND = No Determinado, 0* = Presente en cantidades mínimas). [¹ calculado de los datos de Orozco y Madinaveitia (1941),² SPP (1981a)].

Orozco y Madinaveitia (1941) mencionan que es probable que las elevadas concentraciones de HCO₃ y SO₄ encontradas en este lago deriven del CO₂ y H₂S volcánicos, respectivamente (sin embargo, no explican por que éstos no provienen de la misma cuenca de drenaje). Los cloruros son lixiviados de las rocas volcánicas y los NO₃ son contaminantes que provienen del pastoreo intensivo, como ha sido observado en otros lagos ubicados en áreas volcánicas (p.e., en la laguna de Totolcingo, Knoblich, 1973). Los mismos autores explican que las bajas concentraciones de calcio y magnesio en La Alberca se deben a su precipitación como carbonatos (cabe aclarar que el magnesio no precipita normalmente con los carbonatos en condiciones de depósito lacustre sino con los sulfatos). Finalmente indican que la concentración de HCO₃ es más baja de lo esperado —por debajo de su concentración de equilibrio— debido a su transformación a CO₃ como resultado de la pérdida de CO₂. Las sales dominantes de La Alberca en orden de dominancia son NaHCO₃ y Na₂CO₃ > NaCl > Na₂SO₄ (Orozco y Madinaveitia, 1941, SPP, 1981a).

Los lagos cráter de Valle de Santiago son, pues, representantes “típicos” de los lagos Maars con dimensiones reducidas y con forma de circular a elíptica. Normalmente, este tipo de lagos pueden llegar a ser profundos, como lo atestiguan antiguas líneas de costa en algunos de ellos, con relación a su pequeña área superficial. El contenido salino de sus aguas fluctúa desde hiposalinas, como en La Alberca, hasta hipersalinas como es el caso de Rincón de Parangueo. Se catalogan como lagos sódicos por su composición iónica, predominando los carbonatos y bicarbonatos de sodio. Esta composición química particular da lugar a que

sus aguas presenten un pH muy elevado. La combinación de salinidad y pH elevados hacen de estos cuerpos acuáticos, uno de los hábitats más extremos, en donde sólo pueden habitar organismos especializados.

IMPACTOS HUMANOS

Diversos impactos humanos amenazan a los lagos cráter de Valle de Santiago. Éstos se examinan a continuación, siguiendo la categorización de Williams (1993).

Actividades en la cuenca de captación o drenaje

La vegetación natural de la cuenca ha sido prácticamente sustituida por la práctica agrícola, tanto de temporal como de irrigación. Algunos bosques remanentes de pino y encino pueden aún ser vistos en las porciones altas de la cuenca, mientras que los pastizales predominan en las bajas. Estudios paleolimnológicos (Metcalf *et al.*, 1989, 1994) muestran una fase inicial de perturbación de la cuenca desde hace casi 3 500 a 1 400 años A.P., reflejo de la adopción generalizada del cultivo del maíz (*Zea mays*) durante el Preclásico (cultura Chupicuaro). Es probable que la semilla de amaranto (*Amaranthaceae*) haya sido también cultivada como un sustituto del maíz. Posteriormente (< 1 100 años A.P.), se observa otra fase de perturbación más importante que la anterior, la cual coincide con la introducción de las técnicas agrícolas europeas. La combinación de las alteraciones humanas (i.e. episodios de erosión acelerada debido a la tala de bosques de pino-encino) con épocas de sequía severa ha llevado a la degradación o desertización (erosión y salinización de suelos) generalizada de la cuenca. Esta degradación a gran escala ha sido claramente iniciada por las actividades humanas como lo muestran estudios paleolimnológicos posteriores (O'Hara *et al.*, 1994) en donde se evidencia la relación entre el clima, la ocupación humana y la degradación de los suelos en la región. Los habitantes del centro de México han jugado un papel importante y frecuentemente perjudicial en el paisaje, diseminando la degradación. La adopción de la agricultura sedentaria en la región coincide con el inicio de la erosión antropogénicamente acelerada.

De acuerdo a Williams (1993), la tala de la vegetación de raíz profunda, árboles por ejemplo, y su reemplazo por pastos y otras especies cultivadas de raíces superficiales, conllevan a cambios en la salinidad, composición y estacionalidad de la escorrentía. Frecuentemente, el agua subterránea salina alcanza la superficie vía capilaridad. La evaporación incrementa el contenido salino de los suelos y la precipitación dispersa estas sales a ríos, lagos u otros terrenos con el consecuente incremento de la salinización.

La cría de ovejas y cabras, actividad importante en el área, ha incrementado

la erosión debido al sobrepastoreo. Los senderos causados por lo animales, la ruptura de la cubierta protectora del suelo y la remoción de los pastos conllevan a la erosión y movilización de las partículas del suelo. Los resultados obvios son la erosión hídrica y eólica.

Adicionalmente, sedimentos finos resultado del proceso de desecación de amplias áreas que rodean las zonas lacustres, conformados por bicarbonato y carbonato de sodio precipitado de las aguas de los lagos al irse desecando, forma tormentas de polvo que transportan estos sedimentos a las zonas de cultivo adyacente, incrementando el riesgo de salinizar los suelos. En una cuenca vecina, la desecación de un pequeño lago (i.e. La Piscina de Yuriria) causó tan serios problemas de salud (i.e. enfisema) en la población al respirar estas partículas, que el gobierno tuvo que rellenar el lago con aguas subterráneas para resolver el problema. Actualmente la zona está siendo convertida en una zona recreacional.

Desviación de afluentes

La mayor parte del agua de estos lagos cráter proviene del manto freático. Sin embargo, como se mencionó con anterioridad, los manantiales a que Orozco y Madinaveitia (1941) hacen referencia, así como los que mencionan los lugareños para otros lagos, se han desecado. La extracción intensiva de agua subterránea para irrigación es, probablemente, la razón de ello. Un número creciente de invernales en la zona ha incrementado la demanda de mayores cantidades del vital líquido. Presumiblemente, esta actividad es intensiva y requiere grandes cantidades de agua subterránea para mantener la irrigación.

La zona de Valle de Santiago es famosa debido a los enormes vegetales cultivados por los lugareños. Existen algunas fotografías publicadas en revistas de difusión que muestran una col de 25 kg, una cebolla de 7 kg, un jitomate de 1 kg y otras verduras más.

Contaminación

Afortunadamente, la contaminación del agua no es aún un problema mayor en los lagos cráter de Valle de Santiago. A lo largo de la orilla se observa basura, latas, botellas, bolsas de plástico, etc. Los lagos se emplean, además de la recreación, para el aseo personal y lavado de ropa. Con ello se introducen grandes cantidades de detergentes y blanqueadores, cuyo efecto es desconocido por el momento. La entrada de fósforo proveniente de los detergentes y fertilizantes aplicados en las zonas de cultivo aledañas se suma a la de por sí elevada disponibilidad de nutrientes en los lagos. A pesar de ello, los lagos parecen haber sido por largo tiempo eutróficos. Lo anterior es evidenciado por los florecimientos permanentes de cianobacterias como *Oscillatoria* en La Alberca y *Spirulina* en Rincón de Paran-

gueo (Green, 1986). Metcalfe y O'Hara (1992) registraron una tasa de eutrofización acelerada en los lagos ubicados a lo largo del Eje Neovolcánico (las tierras altas del centro de México) en tiempos recientes (< 1 100 años AP).

Otros cuerpos acuáticos de la región presentan severos problemas de contaminación doméstica e industrial. Baste recordar que la cuenca a la que pertenecen los lagos, Lerma-Santiago, es una de las más contaminadas de México. Ésta recibe contaminantes industriales diversos (67%) así como contaminación doméstica (33%). Las industrias principales que contribuyen a la contaminación en la zona son fertilizantes, papelera, alimentos, metales, azúcar, química y petrolera (Sedue, 1986, Challenger, 1998).

Impactos físicos en las cuencas lacustres

El impacto más importante en la cuenca es la extracción intensiva de agua subterránea para irrigación y suministro de agua potable. La tasa de abatimiento actual del nivel freático fluctúa entre 0.5 y 2.5 metros anuales (Laboratorio de Control de Calidad de Agua, gobierno de Guanajuato, datos no publicados). Con la creciente actividad agrícola de irrigación basada en la extracción de agua subterránea, se han perforado más pozos profundos, dejando atrás la agricultura de temporal que dependía de la precipitación pluvial. Adicionalmente, algunos sitios naturales de recarga están siendo disminuidos, al emplearlos como fuente de obtención de material para la industria de la construcción (arena, grava) y, en otros, por la deforestación las tasas de infiltración han disminuido por la deforestación, favoreciendo la erosión.

Entre las ciudades de Salamanca y Valle de Santiago la profundidad del nivel freático se comporta como una plancha que cubre toda esta porción del valle dominando una profundidad de 20 y hasta 30 m en los alrededores del frente volcánico de las 7. El comportamiento general observado para el esquema de flujo de agua subterránea se muestra como una importante entrada de aguas subterráneas al valle procedente del frente volcánico de las Siete Luminarias, el cual se define por la equipotencial de 1 700 msnm, y que se deforma por la posible entrada que proviene del acuífero del Valle de Celaya por la zona de Jaral de Progreso.

En la Parte plana del valle entre la ciudad de Valle de Santiago y el poblado El Cuarto de Altamira, la elevación del nivel estático se mantiene constante como una plancha definida por la equipotencial de 1 690 msnm, ese efecto está muy relacionado con el cauce del río Lerma y la extensa red de canales de riego pertenecientes al Distrito de Riego 011, los cuales mantienen una recarga vertical constante al acuífero, lo que se refleja con niveles estáticos someros del orden de los 20 a 30 metros de profundidad. Para establecer la evolución del nivel estático en el Valle de Santiago se analizó la historia piezométrica, con el ma-

por número de datos y una mejor distribución de los puntos de observación. La tendencia de los niveles de saturación en la zona de estudio, manifiesta una clara evolución negativa, en promedio el abatimiento observado en el periodo entre julio de 1996 y julio de 1998 es del orden de los 3.0 m.

A lo anterior se suma que el riego por aspersión típico de las técnicas agrícolas modernas aplicadas en climas secos o semisecos induce la salinización del suelo. Esto es debido a que el agua se evapora antes de llegar al suelo, lo cual favorece la disminución de la productividad agrícola.

Impactos directos en los recursos bióticos de relevancia económica local

El proceso de desecación de los lagos es el factor que, obviamente, representa el mayor impacto en los organismos acuáticos. Debido a la combinación de los factores antes mencionados, San Nicolás de Parangueo y Cíntora se encuentran totalmente secos y los otros dos lagos se han visto reducidos ampliamente. Tal es el caso de La Alberca, en donde se menciona un descenso de una profundidad base de 50 m, a 35 m en 1985, a tan solo 10 m en 1995, 8.5 m en 1996 y solamente algunos centímetros en 2002. Rincón de Parangueo no se queda atrás, a juzgar por los enormes depósitos de tequezquite que se encuentran circundando al lago y que indican una diferencia de nivel de, por lo menos, 15 a 20 metros para 1995. En 2002 restaba, a lo sumo, medio metro.

El charal endémico de La Alberca (Barbour, 1973, Espinosa *et al.*, 1993) se encuentra amenazado no sólo por la desecación de su hábitat, sino también por la introducción de especies exóticas como la tilapia. Las otrora abundantes pesquerías de charal se han reducido notablemente. Es probable que estos cambios de nivel sean también los responsables de la drástica disminución de la “mosca alcalina” en Rincón de Parangueo, lo cual tuvo un impacto negativo para la economía local.

Por su origen, estos lagos presentan una batimetría muy escarpada. Las zonas someras de los lagos, las más productivas, han desaparecido prácticamente al descender el nivel de los lagos. Las aves acuáticas asociadas con los humedales marginales han visto reducidas sus áreas de alimentación, anidación y cría.

En resumen, la deforestación, el sobrepastoreo, el abatimiento del manto freático y la salinización del suelo han inducido una degradación generalizada de la cuenca (erosión y desertización). Se trata de una degradación de largo plazo iniciada desde tiempos prehispánicos. De esta forma, las actividades humanas han provocado un clima más seco y cálido, escasez del recurso hídrico, tolveneras, salinización de suelos y, por supuesto, una disminución generalizada en la economía local y regional. Los recursos superficiales y subterráneos de Valle de Santiago se encuentran fuertemente amenazados. En la actualidad, los cuatro lagos cráter se han secado y el abatimiento del manto freático alcanza actualmente has-

ta 2.5 m por año. No existe ningún programa de uso sustentable del recurso acuático a pesar de la urgencia de ello (Alcocer *et al.*, 2001) y de que el gobierno declaró esta área: 1) vedada para la extracción de agua subterránea y 2) Área Natural Protegida en la categoría Monumento Natural, en 1997. La problemática de ésta zona ejemplifica claramente los retos que enfrenta México ante el problema de falta de agua (Alcocer *et al.*, 2002).

Se requiere llevar a cabo estudios detallados y de largo plazo para definir los factores que están provocando este agotamiento de las fuentes de agua en la región y proponer esquemas de aprovechamiento acordes con la disponibilidad en las regiones y tendientes a restablecer el equilibrio ecológico; en forma colaborativa con los actuales usuarios del agua para lograr un desarrollo justo y equilibrado en esas regiones.

REFERENCIAS

- Alcocer, J., 2002, "Major surface water challenges in Mexico", *LakeLine*, 22(4), pp. 28-31.
- Alcocer, J. y E. Escobar, 1996, "Limnological regionalization of Mexico", *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2, pp. 55-69.
- Alcocer, J., E. Escobar y A. Lugo, 2000, "Water use (and abuse) and its effects on the crater-lakes of Valle de Santiago, Mexico", *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 5, pp. 145-149.
- Alcocer, J., E. Escobar y A. Lugo, 2001, "The urgency of implementing sustainable water management plans in Mexico", D. Harper y M. Zalewski (eds.). *Ecohydrology. Science and the sustainable management of tropical waters*, IHP-V, Technical Documents in Hydrology No. 46. Unesco. Paris, p. 96.
- Alcocer, J., A. Lugo y M.G. Oliva, 2002, "Los lagos cráter de Valle de Santiago, Guanajuato", G. de la Lanza y J.L. García (comps.), *Lagos y presas de México*, Centro de Ecología y Desarrollo, México. 2a. edición, pp. 193-212.
- Barbour, C.D., 1973, "The systematics and evolution of the genus *Chirostoma* Swainson (Pisces, Atherrinidae)", *Tulane Studies in Zoology and Botany*, 18 (3), pp. 97-141.
- Cetenal, 1971, *Carta topográfica. Hoja Querétaro F14-10*, 1: 250 000.
- Cetenal, 1973a, *Carta geológica. Hoja Valle de Santiago F-14-C-73*, 1: 50 000.
- Cetenal, 1973b, *Carta uso de suelo. Hoja Valle de Santiago F-14-C-73*, 1: 50 000.
- Challenger, A., 1998, "Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres en México. Pasado, presente y futuro", Conabio y Sierra Madre, México.
- Cole, G.A. y W.L. Minckley, 1968, "Anomalous" thermal conditions in a hypersaline inland pond", *J. Arizona Acad. Sci.*, 19, pp. 77-79.
- Espinosa, H., M.T. Gaspar y P. Fuentes, 1993, *Listados faunísticos de México*. III. *Los peces dulceacuícolas mexicanos*, Instituto de Biología, UNAM, México, 98 pp.

- Green, J., 1986, "Associations of zooplankton in six crater lakes in Arizona, Mexico and New Mexico", *J. Zool. Lond*, 208, pp. 135-159.
- Knoblich, K., 1973, "Las condiciones de las aguas subterráneas en la cuenca de El Seco-Oriental (Puebla-Tlaxcala/México)", en *Comunicaciones Proyecto Puebla-Tlaxcala*, 9, pp. 1-4.
- Metcalfe, S.E. y S.L. O'Hara, 1992, "Sensibilidad de lagos mexicanos a alteraciones en el medio ambiente: ejemplos del Eje Neovolcánico", *Ingeniería Hidráulica en México*, 7, pp. 107-121.
- Metcalfe, S.E., F.A. Street-Perrott, R.B. Brown, P.E. Hales, R.A. Perrott y F.M. Steininger, 1989, "Late Holocene human impact on lake basins in central Mexico", *Geoarchaeology*, 4 (2), pp. 119-141.
- Metcalfe, S.E., F.A. Street-Perrott, S.L. O'Hara, P.E. Hales y R.A. Perrott, 1994, "The palaeolimnological record of environmental change: examples from the arid frontier of Mesoamerica", A.C. Millington y K. Pye (eds.). *Environmental change in drylands: biogeographical and geomorphological perspectives*. Wiley. Nueva York, pp. 131-145.
- O'Hara, S.L., S.E. Metcalfe y F.A. Street-Perrott, 1994, "On the arid margin: the relationship between climate, humans and the environment. A review of evidence from the highlands of central Mexico", *Chemosphere*, 29 (5), pp. 965-981.
- Orozco, F y A. Madinaveitia, 1941, "Estudio químico de los lagos alcalinos", *An. Inst. Biol. Univ. Nal. Autón. Méx.*, 12, pp. 429-438.
- Rojas, B., 1985, *Valle, corazón del Bajío. Municipio de Valle de Santiago*, Guanajuato, 356 pp.
- Sedue, 1986, *Informe sobre el estado del medio ambiente en México*, Sedue, México.
- SPP, 1980, *Carta estatal hidrológica subterránea. Hoja Guanajuato*, 1: 500 000
- SPP, 1981a, *Carta hidrológica de aguas superficiales. Hoja Querétaro F14-10*, 1: 250 000.
- SPP, 1981b, *Carta hidrológica de aguas subterráneas. Hoja Querétaro F14-10*, 1: 250 000.
- Wetzel, R.G., 2001, *Limnology. Lake and river ecosystems*, Academic Press, San Diego. 1006 pp.
- Williams, W.D., 1993, "Conservation of salt lakes", *Hydrobiologia*, 267, pp. 291-306.

EL LAGO DE CHAPALA: DESTINO FINAL DEL RÍO LERMA

*Anne M. Hansen
y Manfred van Afferden*

INTRODUCCIÓN

Lerma-Chapala es una subcuenca de la Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico con un área total de aproximadamente 140 000 km². La cuenca del río Lerma, que termina en el lago de Chapala, tiene un área superior a 50 000 km²; tiene una precipitación promedio anual de 730 mm y es afectada por fenómenos cíclicos como huracanes y sequías, que con cierta frecuencia causan daños en el área. El clima predominante en la cuenca es subtropical semi-árido, con épocas de lluvia y estiaje bien definidas. El río Lerma tiene una longitud mayor a 700 km y tiene entre los tributarios más importantes a los ríos Laja, Turbio, Angulo y Duero. Aparte del lago de Chapala, en la misma cuenca se encuentran varios lagos naturales como Pátzcuaro, Cuitzeo y Yuriria, así como un elevado número de presas y bordos. La cuenca incluye importantes zonas agrícolas e industriales. En la figura 1 se señala la localización de la Cuenca Lerma-Chapala.

El lago de Chapala es el lago mexicano de mayor dimensión. Es un lago tropical somero y turbio, representa un ecosistema único y sirve como abastecimiento de agua para Guadalajara. Con dimensiones de 70 km de largo y 15 km de ancho, el lago de Chapala tiene una capacidad de almacenamiento máximo de 9 686 Mm³ con una superficie de 1 161 km². Durante el periodo entre 1934 y 2003, el lago ha tenido una profundidad promedio de 4.86 m, con una máxima de 8.35 m registrada en octubre de 1935 y una mínima de 1.42 m en 1955 (CNA-IMTA, 2000 y Aguilar, 2003, tabla 1).

En el mes de julio de 2002 el volumen de agua en el lago de Chapala bajó a 1 145 Mm³, muy cerca del mínimo histórico. Esto representa 12% de su máxima capacidad. A partir de las excepcionalmente fuertes lluvias en toda la Cuenca Lerma-Chapala durante el verano-otoño del 2003, el volumen del lago ha llegado a casi 4 000 Mm³ en el mes de octubre del 2003 y se espera un incremento todavía mayor. Es la primera vez en siete años que el lago alcanza estos niveles (figura 2).

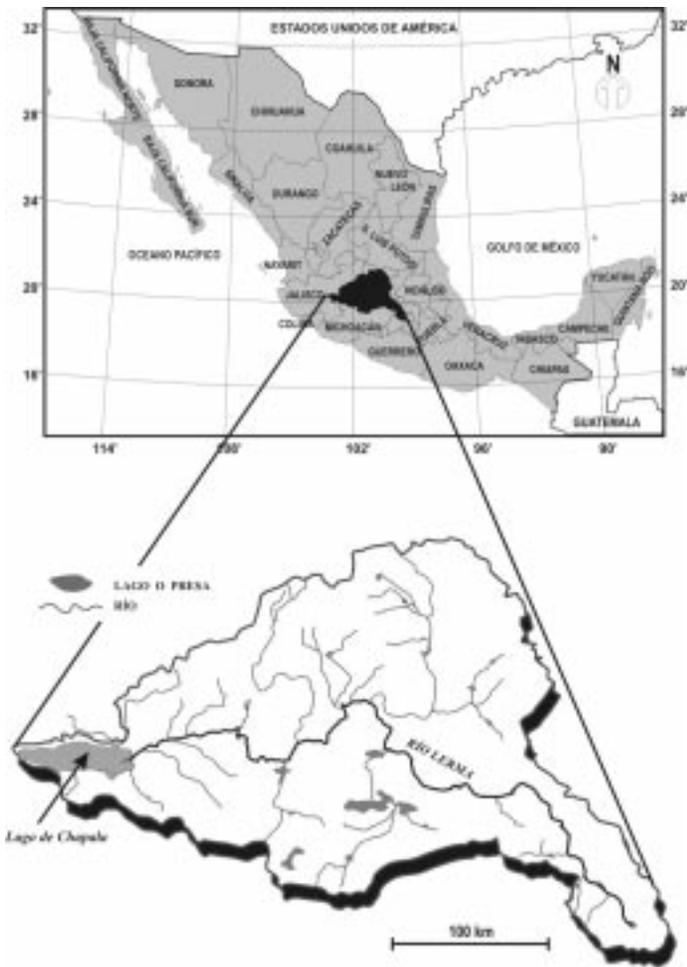


FIGURA 1. Localización de la Cuenca Lerma-Chapala, México.

TABLA 1
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DEL LAGO DE CHAPALA

<i>Válor</i>	<i>Volumen (Mm³)</i>	<i>Profundidad media (m)</i>	<i>Área de superficie (km²)</i>	<i>Periodos y fechas</i>
Mínimo	953.98	1.42	670.09	Julio, 1955
Máximo	9 686.33	8.35	1 160.71	Octubre, 1935
Promedio mensual	5 116.25	4.86	1 053.54	Marzo, 1934, a octubre, 2003

Fuente: CNA-IMTA, 2000 y Aguilar, 2003.

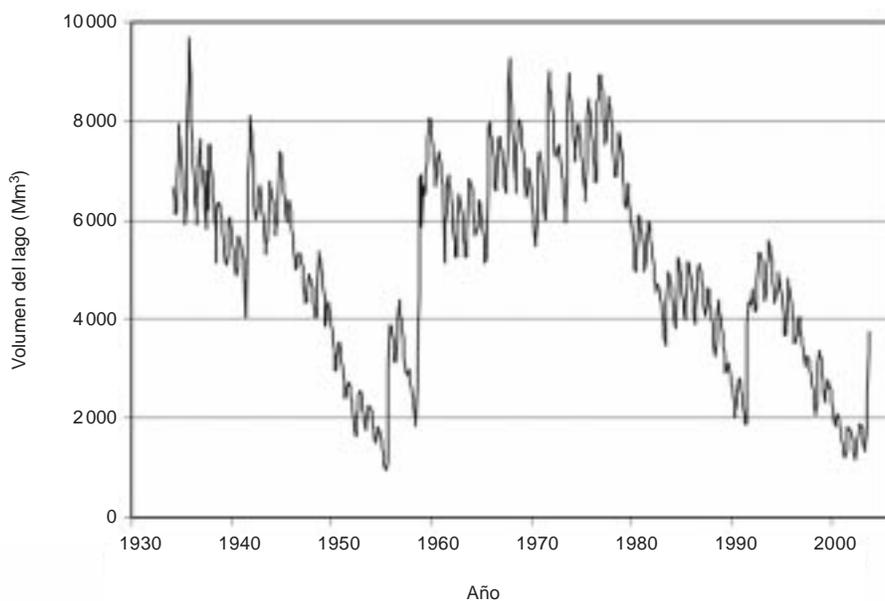


FIGURA 2. Volúmenes históricos de agua en el lago de Chapala, 1934-2003.

Fuente: CNA-IMTA, 2000 y Aguilar, 2003.

LA CUENCA LERMA-CHAPALA

Aún cuando el nivel de agua en el lago de Chapala ha alcanzado niveles superiores a lo usual, la cuenca del río Lerma sufre la peor crisis de la historia, que se manifiesta en escasez de agua y deterioro ecológico, causando conflictos económicos y sociales. A continuación se describen las manifestaciones en el balance del agua y su calidad.

BALANCE DE AGUA EN LA CUENCA

A medida que se incrementa la actividad económica en las cuencas hidrológicas, también incrementa la demanda de agua. El agua superficial en la cuenca del río Lerma así como en los alrededores, está completamente asignado y la cuenca se clasifica como deficitaria (CNA, 2003). Esto ha llevado a una sobrexplotación de los recursos superficiales y subterráneos, que ponen en peligro tanto al medio ambiente como la sustentabilidad de la región a largo plazo.

La precipitación pluvial promedio en la cuenca es de 735 mm lo cual corresponde a aproximadamente 36 000 millones de metros cúbicos (Mm^3) por año. Con una evaporación potencial promedio de 1 977 mm, la mayor parte de la precipitación se evapora en la misma cuenca, resultando en escurrimientos tan sólo del orden 4 000 a 6 000 Mm^3 y recargas entre 3 500 y 4 000 Mm^3 por año (CNA, 1999; Aparicio, 2001; León *et al.*, 2001; Wester *et al.*, 2001 y CNA, 2003).

El balance hidráulico de las aguas superficiales en 15 de 16 subcuencas que conforman la Cuenca Lerma-Chapala está calificado como deficitaria (CNA, 2003). Con respecto al balance del agua subterránea, específicamente en la región de medio Lerma se reporta una sobreexplotación de aproximadamente 1 000 Mm^3 por año (CNA, 2003), que representa alrededor de 25% de la recarga total en toda la cuenca.

Esta situación crítica durante las últimas décadas, está estrictamente relacionada con el uso del agua en la cuenca. Un análisis del aprovechamiento consuntivo del agua en la región está resumido en la tabla 2.

TABLA 2
PORCENTAJES DE USOS CONSUNTIVOS DE AGUA
EN DIFERENTES REGIONES DE LA CUENCA LERMA-CHAPALA

<i>Región</i>	<i>Agrícola</i>	<i>Industria</i>	<i>Pecuario</i>	<i>Agua Potable</i>
Alto Lerma	59	31	3	7
Medio Lerma	87	3	2	8
Bajo Lerma	67	3	4	26

Adaptada de CNA, 2003.

Los datos indican, que el principal consumidor de agua en la cuenca es la agricultura, que consiste en una alta densidad de distritos de riego, especialmente en el área del Bajío (Medio Lerma) con 66% de los distritos de riego de toda la cuenca.

La superficie de irrigación regional demanda un volumen anual de aproximadamente 7 800 Mm^3 , lo que significa que actualmente sólo se satisface a 89%. Los principales cultivos son el maíz que cubre 58% de la superficie cultivable, frijol con 15%, sorgo con 14%, trigo con 8% y 5% de otros cultivos (CNA, 2003).

Se puede concluir que la parte media de la cuenca es la región más agrícola y esto tiene una fuerte influencia sobre el déficit de las aguas subterráneas. Como consecuencia, los niveles del agua subterránea disminuyen hasta 2.6 m por año (Scott *et al.*, 2001) y se han disminuido drásticamente los niveles de ríos y lagos (véase sección El lago de Chapala).

CALIDAD DE AGUA EN LA CUENCA

El agua en la cuenca ha estado siendo contaminada durante varias décadas debido a las descargas de ciudades, industrias y agricultura. A pesar de los esfuerzos que se han realizado para incrementar en número y capacidad las plantas de tratamiento en la cuenca, hoy día son desechadas cantidades importantes de aguas residuales sin tratamiento alguno. Otra causa que origina el deterioro en la calidad del agua, es la erosión. De acuerdo con León *et al.* (2001), la erosión puede ser considerada como uno de los problemas ecológicos más serios en la cuenca y que afecta los recursos naturales y la calidad del agua. Tan sólo en la región del Medio Lerma, el volumen total de descargas de aguas residuales de origen municipal e industrial, es de 278 Mm³ (CNA, 2003). Esta cantidad representa más de 40% del volumen promedio anual, que ha entrado al lago de Chapala por el río Lerma durante los últimos 25 años (Aparicio, 2001).

La calidad del agua se monitorea en estaciones operadas por la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad de Agua de la Comisión Nacional del Agua (CNA). El grado de contaminación se evalúa a partir de un promedio ponderado de los Índices de Calidad de Agua (ICA) de 18 parámetros, entre los cuales se encuentra el pH, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los sólidos suspendidos. De acuerdo con esta clasificación, el río Lerma y los tributarios, que forman parte de la red, se califican en su mayor parte como “contaminados” (CNA, 2003). Sin duda, en el ámbito local existen zonas “muy contaminadas” cerca de descargas puntuales.

El ICA está siendo utilizado por la CNA como principal indicador de la calidad en los cuerpos de agua. Sin embargo, “calidad del agua” incluye también otros parámetros que no se monitorean en forma rutinaria, por ejemplo sustancias indicadoras de giros específicos como es el caso del cromo en la industria peletera o de plaguicidas organoclorados en la agricultura e hidrocarburos derivados de la refinación y de plantas generadoras de energía eléctrica.

Mientras que los parámetros que se miden en la red primaria de monitoreo de la CNA, son relativamente fáciles de remover en plantas de tratamiento convencionales, la eliminación de contaminantes recalcitrantes como metales pesados, plaguicidas y algunos hidrocarburos, requiere de tratamientos específicos. La presencia de estas sustancias podría constituir un riesgo para la calidad de agua en zonas afectadas. El control de estos contaminantes requiere más que el tratamiento tradicional de descargas; entre otras medidas la reducción de descargas industriales a través de prevenciones integrados en la producción, restricción de usos y aplicaciones de productos.

Hansen y van Afferden (2001a) reportaron el desarrollo de un inventario de aproximadamente 3 500 industrias y empresas en la cuenca que incluyen las ramas de alimenticia, química, farmacéutica, petroquímica, minera, automotriz,

maderera y derivados, peletera, textil, metalúrgica y agroquímica. Basándose en este inventario, se estimaron las contribuciones de contaminantes provenientes de descargas industriales en 65 municipios industrializados de la cuenca y se identificaron a los principales municipios que potencialmente contribuyen con este tipo de contaminación. A pesar de que este inventario no contiene información sobre todas las industrias y además debe ser actualizada en forma continua, proporciona información sobre las principales fuentes de contaminantes industriales en la cuenca.

Los datos existentes sobre contaminantes tóxicos en sedimentos de la cuenca del río Lerma, se encuentran por debajo del criterio de Nivel de Severo Efecto Ecotoxicológico (SEL) que se adoptó por el gobierno canadiense (CCME, 1999) para sedimentos altamente contaminantes. Sin embargo, el análisis comparativo de los datos con un criterio de Nivel de Bajo Efecto Ecotoxicológico (LEL, CCME, 1999), refleja una situación diferente. Los sedimentos exceden este nivel en al menos un parámetro, indicando que son afectados por las descargas industriales, municipales o agrícolas. Los detalles sobre parámetros correspondientes a estos sectores y las concentraciones en sedimentos de la cuenca del río Lerma, fueron publicados por Hansen y van Afferden (2001a).

De acuerdo con la CNA (2003), se han detectado problemas en la calidad de agua subterránea en los siguientes lugares dentro de la cuenca:

- en algunas áreas del Valle de Toluca existe contaminación por metales pesados
- Valle de Querétaro con contaminación de hidrocarburos, aceites y grasas
- Lago de Cuitzeo-Acámbaro con contaminación natural por arsénico
- Valle de León con altos contenidos de cromo por el riego con aguas residuales
- La Barca con contaminación de origen agrícola
- Acuíferos de Toluquilla, Poncitlán y Ocotlán con altos contenidos de nitratos
- Acuífero de Atemajac con contaminación por hidrocarburos y sulfato de cobre
- Acuífero de Aguascalientes con contaminación natural de flúor el mismo comentario que para Cuitzeo

EL LAGO DE CHAPALA

Como el lago de Chapala es el destino final del agua captada en la cuenca del río Lerma, refleja y hasta cierto grado magnifica los problemas relacionadas con el agua en toda la cuenca. En las secciones siguientes se describe el balance y la situación de la calidad de agua en el lago de Chapala así como herramientas para su manejo.

BALANCE DEL AGUA DEL LAGO

En la figura 3 se presenta el balance de agua del lago de Chapala estimado para el periodo comprendido entre 1990 y 2000 (Aparicio, 2001). Se observa que la evaporación significa el principal volumen de salida de agua del lago y la entrada por el río Lerma representa sólo 23% de todas las entradas. Existen indicaciones de que el agua subterránea en la cuenca propia tiene poca influencia en este balance (González-Hita *et al.*, 1993 y González-Hita, 1999). Sin embargo, se requiere estudiar con mayor detalle las entradas por fuentes hidrotermales y las salidas por infiltraciones preferenciales debido a movimientos tectónicos (Zárate-del Valle *et al.*, 2001).

CALIDAD DEL AGUA EN EL LAGO

De los pocos datos existentes sobre metales pesados en el agua del lago de Chapala, se ha observado que durante épocas de bajos niveles del lago, las concentraciones de cadmio y plomo rebasan los límites de la USEPA (Ayla Jay y Ford, 2001) y del NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000) para agua potable. Las

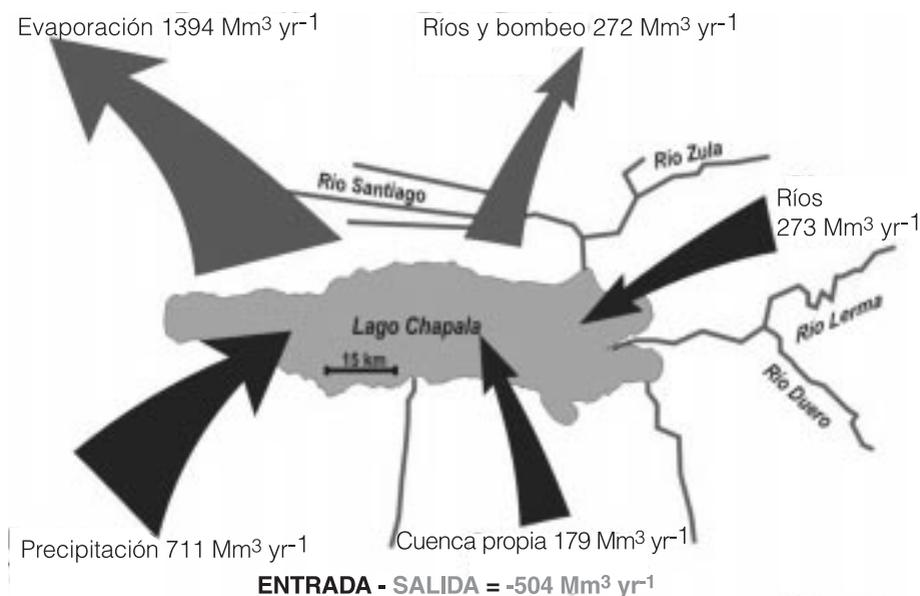


FIGURA 3. Balance de agua en el lago de Chapala en 1995.

Fuente: Aparicio, 2001.

concentraciones de arsénico disuelto en el agua rebasan frecuentemente la concentración de 25 mg/L establecida por la misma Norma Oficial Mexicana para agua de uso y consumo humano, indicando una urgente necesidad de monitoreo de otros parámetros diferentes al ICA y las demás medidas, que se incluyen en la Red Nacional de Monitoreo.

La sobrexplotación de los recursos pesqueros en conjunto con la baja productividad del sistema, son en gran parte causados por el decremento de la cantidad y calidad del agua. Los escasos datos existentes sobre concentraciones de metales pesados en peces, no exceden los límites que causan toxicidad aguda, pero apuntan a valores de riesgos crónicos en la salud humana, causados por consumo de pescado (Ayla Jay y Ford, 2001).

Hansen y van Afferden (2004) analizaron los datos de monitoreo de calidad del agua en el lago de Chapala de 1974 a la fecha. Observaron que con respecto a la calidad del agua, el lago funciona como un sistema mezclado en toda su extensión y que existe una relación predecible entre el volumen de agua y la calidad. Esto coincide con lo observado por Lind y Dávalos-Lind (2001) quienes explican estos procesos por la acción del viento y la concentración de contaminantes durante bajos niveles así como la dilución del agua durante periodos de lluvia.

En la figura 4 se presentan los promedios de los sólidos disueltos, alcalinidad y dureza total medidos en el lago entre 1974 y 2000, como función del volumen de agua. Estos promedios fueron depurados a través de un filtrado estadístico, que eliminó los promedios con desviación estándar arriba de 15%. Esto resultó en la eliminación de aproximadamente 20% de la población original de datos, que probablemente refleja eventos de muestreo cuando el lago no ha sido totalmente mezclado o faltantes en la captura de los datos.

Observando la tendencia de una población de datos que representa 80% de los resultados de monitoreo, se evidencia que, al disminuir el volumen de agua en el lago, disminuye la calidad. Esto obedece a que el lago funciona como un "sistema cerrado" donde las únicas salidas de agua son la evaporación y el agua que se extrae para diferentes usos.

Aplicando la legislación y los criterios ecológicos para diferentes usos de agua (SSA, 2000 y CNA, 1989) a estos resultados, se puede inferir que las concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT) y de alcalinidad aumentan a valores superiores a los establecidos. La NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000) establece un límite para SDT en agua para uso y consumo humano, de 1 000 mg L⁻¹, mientras que los criterios ecológicos (CNA, 1989) establecen una concentración de 400 mg L⁻¹ para alcalinidad para fuente de abastecimiento de agua potable. Se observa que a volúmenes del lago inferiores a aproximadamente 2 000 Mm³, se excede estos límites.

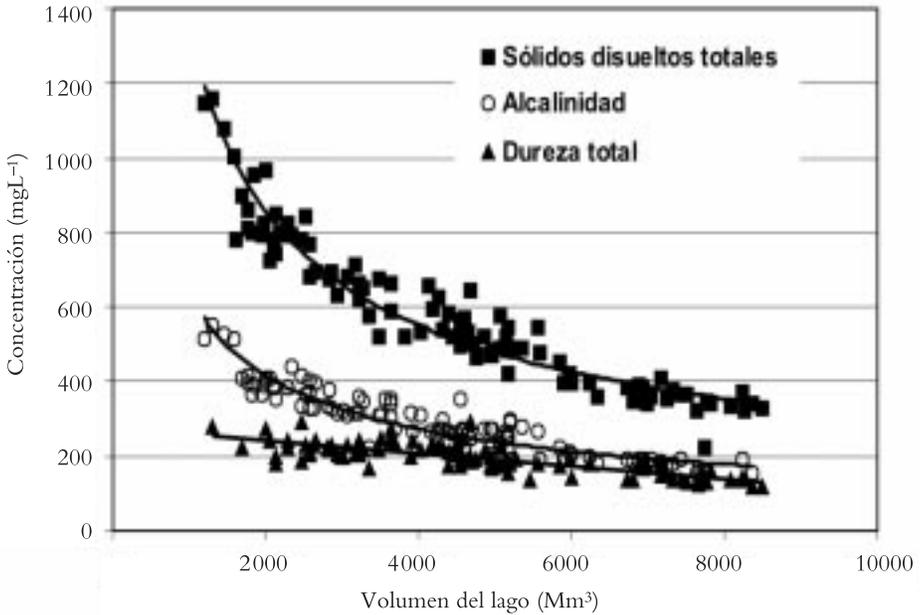


FIGURA 4. Concentraciones promedio de algunas variables químicas como función del volumen de agua en el lago de Chapala.

Fuente: Hansen y van Afferden, 2004.

Bajo el mismo principio y aplicando un modelo de equilibrio químico que incluye la atenuación natural de cadmio en los sedimentos del lago, Hansen y van Afferden (2004) desarrollaron una simulación de las concentraciones de cadmio en el agua a diferentes niveles. De igual forma se observa un aumento en la concentración de este contaminante, como función del volumen de agua en el lago. A pH 8, que es el real del agua en el lago, la concentración de cadmio fue simulado debajo de los niveles máximos tolerables (CMC), mientras que a valores más bajos de pH (6 y 7), las concentraciones rebasarían los niveles máximos tolerables (CMC). Cabe mencionar que estos niveles ya fueron corregidos por las concentraciones de dureza en el agua de acuerdo con las especificaciones de la EPA (2001).

Con este tipo de información se podría establecer un sistema de alerta de la calidad del agua para diferentes usos, basándose en el monitoreo del volumen de agua en el lago.

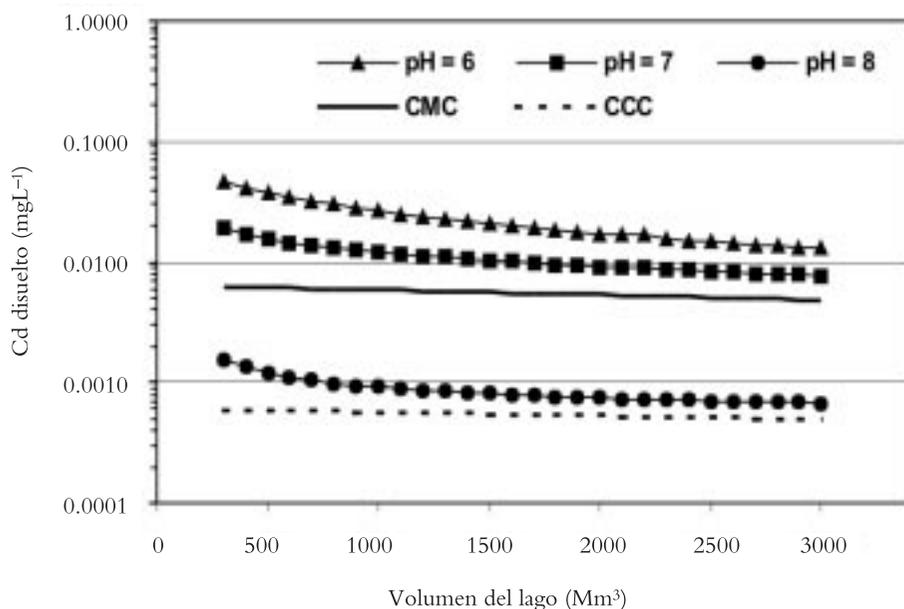


FIGURA 5. Simulación de la acumulación de cadmio en el agua del lago de Chapala como función del volumen.

Fuente: Hansen y van Afferden, 2004.

MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO

Pronóstico de los volúmenes del lago a corto plazo

El clima en la Cuenca Lerma-Chapala se caracteriza por una época de lluvias entre junio y octubre y estiaje el resto del año con pocas lluvias esporádicas entre diciembre y enero, motivo por el cual el nivel del lago varía en ciclos anuales bien definidos. Conociendo el máximo volumen del lago a final de la época de lluvias, se puede pronosticar el siguiente mínimo con una probabilidad de 90% de error menor a 5% del volumen mínimo real, aplicando la siguiente ecuación, que principalmente se basa en la evaporación del agua en el lago (Hansen y van Afferden, 2004).

$$V_{min} = V_{máx} - (A_{máx} * E_{md} * t_{md}) * a \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

- V_{min} = volumen mínimo del lago pronosticado (m^3)
- $V_{máx}$ = volumen máximo del lago a final de la época de lluvias (m^3)
- $A_{máx}$ = área máximo del lago a final de la época de lluvias (m^2)
- E_{md} = evaporación promedio en estiaje, 1971-2001 ($4.94 \times 10^{-3} m^3 m^{-2} d^{-1}$)
- t_{md} = duración promedio del estiaje, 1934-2001 (243.8 d)
- a = factor de ajuste empírico (0.944)

En la figura 6 se muestran los volúmenes mínimos estimados así como los máximos y mínimos reales. Se observa que con una anticipación de aproximadamente ocho meses, se puede pronosticar el siguiente volumen mínimo del lago. En casos de niveles críticos de agua, este método permite tomar decisiones con respecto al manejo de la cuenca, para hasta cierto grado controlar el volumen del lago a través de medidas a corto plazo como trasvases y/o restricciones en el sector agrícola.

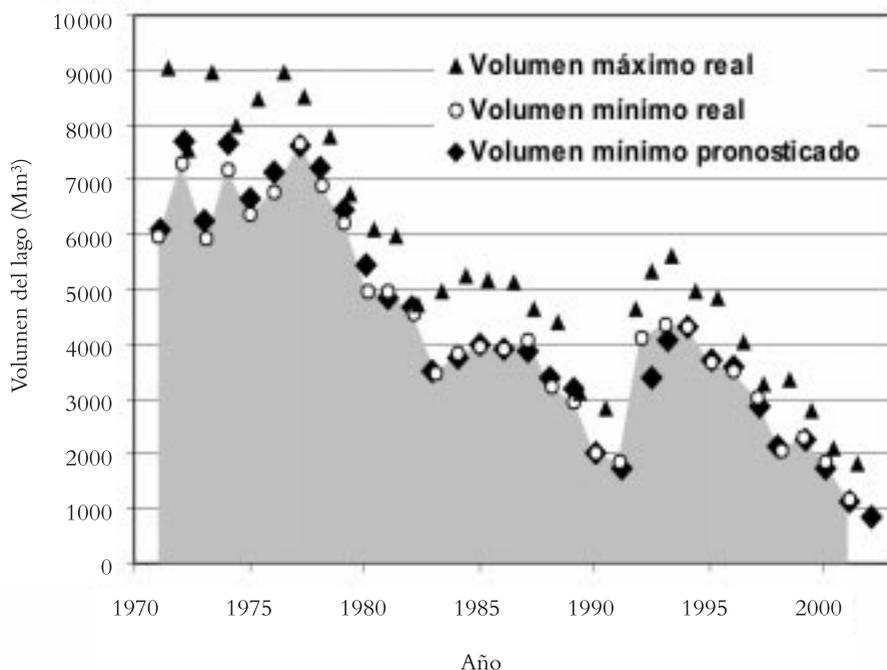


FIGURA 6. Volúmenes máximos y mínimos y estimación de volúmenes mínimos anuales en el lago de Chapala.

Fuente: Hansen y van Afferden, 2004.

Pronóstico de los volúmenes del lago a largo plazo

El pronóstico a largo plazo del volumen de agua en el lago de Chapala, depende de múltiples factores como la precipitación, el clima y los usos consuntivos del agua en la cuenca y el mismo lago. Estos factores implican un alto grado de incertidumbre que hace un pronóstico exacto extremadamente difícil. A pesar de ello, Hansen y van Afferden (2004) desarrollaron una herramienta que per-

mite calcular la tendencia de los volúmenes del agua en el lago y la calidad a largo plazo. Esta herramienta se basa en el balance de agua para el lago. Cuando se reduce el volumen de agua, también disminuye el área de la superficie del lago y, por lo tanto, la evaporación. Este proceso reduce el déficit en el balance de agua y mediante la herramienta se calculan los cambios en el balance cada año sucesivo, llegando a eliminarse el déficit cuando el volumen y la superficie del lago sean suficientemente pequeños. Este estado de “equilibrio” describe el nivel hacia el cual tiende el lago a largo plazo para volumen y balance inicial dados, sin considerar cambios climáticos o en manejo del agua en la cuenca.

La tendencia en la evolución del volumen de agua en el lago de Chapala se puede describir con la siguiente ecuación:

$$V_{t+1} = V_t + (\Delta V_0 + E_{my} \star (A_0 + A_t) \star a \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

V_{t+1} = volumen promedio anual del lago en el año $t+1$ (m^3)

V_t = volumen promedio anual del lago en el año t (m^3)

ΔV_0 = variación en el volumen promedio anual (m^3)

E_{my} = evaporación promedio anual, 1971-2000 ($1.77 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$)

A_0 = área promedio anual (m^2) en $t=0$ (inicio de la simulación)

a = factor empírico de ajuste (0.944)

A_t = área promedio anual (m^2) en el año t

La expresión $E_{my} \star (A_0 - A_t)$ representa la diferencia en la pérdida por evaporación debido a los cambios en el área de la superficie del agua en el lago, que fue calculado con base en los datos batimétricos publicados en Hansen y van Afferden (2001a).

Aparte del módulo de evaporación, se podría ampliar el modelo, incluyendo otros parámetros como una corrección de la evaporación por temperatura y viento, especificación de entradas y salidas, interacción con el agua subterránea o módulos para simular cambios climáticos (Filonov *et al.*, 2001). Sin embargo, la evaporación es el principal factor que controla el nivel del lago y por falta de datos sobre los demás parámetros, se puede usar el modelo en su forma simplificada.

La simulación ilustrada en la figura 7 inicia en el año 1995 con un volumen de almacenamiento de agua en el lago, de $4\,270 \text{ Mm}^3$, que corresponde a un área de superficie de agua de $106\,000 \text{ ha}$. Se calculó la variación en el volumen promedio anual, basándose en el déficit de 504 Mm^3 en este año.

La tendencia hacia un nuevo equilibrio en el volumen del agua resulta en un mínimo de casi $1\,300 \text{ Mm}^3$ alrededor del año 2010. Hansen y van Afferden (2004) realizaron simulaciones para el último periodo más crítico en los niveles del lago, de 1995 a 2001, iniciando las simulaciones en diferentes años, usando el promedio de los balances de agua de los años anteriores. Encontraron que el volumen de equilibrio simulado disminuyó desde $1\,300$ hasta 600 Mm^3 , depen-

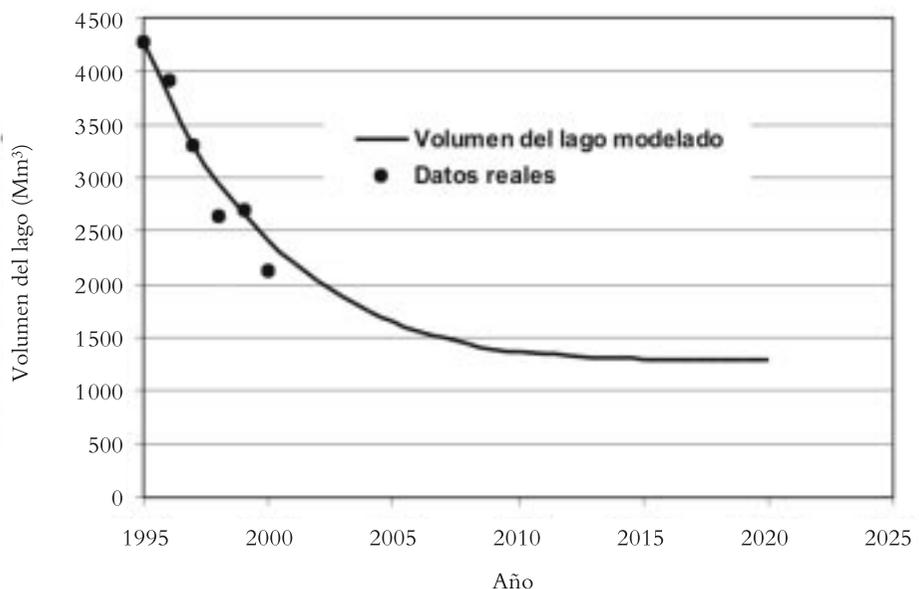


FIGURA 7. Modelación de un nuevo “equilibrio” en el lago de Chapala. Los símbolos rellenos representan los volúmenes promedios anuales de 1995 a 2000.

diendo del año en que se inicia la simulación, debido al aumento relativo en el correspondiente déficit.

A continuación se demuestra cómo podría utilizarse esta herramienta para saber a qué nivel tiende el lago en el futuro, es decir manejar el lago como un sistema con inercia (aunque en la realidad es más complejo o “caótico”), como sucede con un buque pesado en el que cada aceleración o frenado no se da una reacción inmediata sino tiene un tiempo de respuesta. En caso del buque, la meta es establecer una velocidad constante mientras que para el lago de Chapala, la meta es establecer un volumen de agua suficiente y sustentable, por ejemplo un promedio anual de $2\,500\text{ Mm}^3$ (véanse figuras 4 y 8).

El primer ejemplo considera una situación crítica con bajos niveles de agua, como la que se tuvo en los años 2001–2002. En este caso es necesario incrementar nivel de agua en el lago mediante aumento de las entradas y/o reducción en las salidas de agua. La pregunta es ¿qué cantidad se requiere para que el lago se estabilice a un volumen promedio anual de $2\,500\text{ Mm}^3$? La figura 8 muestra tres escenarios, cada uno con diferentes excedentes en el balance de agua del lago. Suponiendo que el lago se encuentra en “equilibrio” inicial a un nivel de $1\,500\text{ Mm}^3$, el resultado de la simulación sugiere que se requeriría que entrara un volumen adicional de 150 Mm^3 por año. Considerando que en realidad el lago no estaba en “equilibrio” sino que seguía disminuyendo el nivel, el volumen nece-

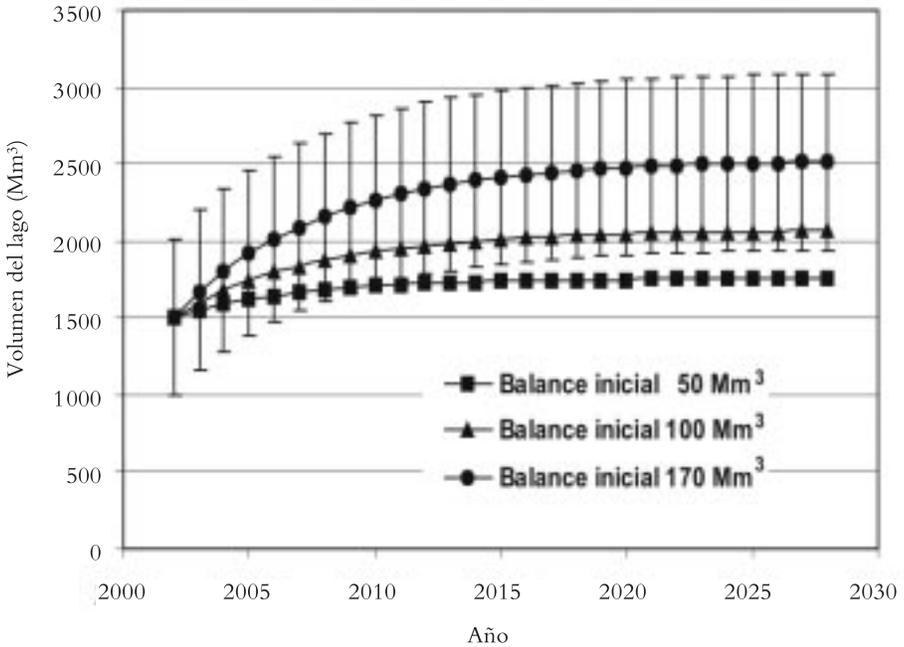


FIGURA 8. Simulación del aumento en el volumen de agua en el lago de Chapala bajo diferentes escenarios de manejo. Las barras (balance inicial 170 Mm³) representan las variaciones estimadas del volumen (máximos y mínimos) para cada año.

sario cada año sería aún más grande. De esta manera, siendo que existe un déficit durante los últimos 25 años de aproximadamente 230–340 Mm³ (-230 = balance promedio entre 1975 y 2001; -340 = balance promedio entre 1993 y 2001), en total se necesitaría una cantidad adicional de 380–490 Mm³ por año para establecer el volumen de 2 500 Mm³. Con una menor modificación, no se alcanzaría este volumen.

Este ejemplo demuestra la gran importancia de conocer con exactitud el balance de agua para el lago cuando se encuentra en el nivel deseado, para definir con mayor detalle el consumo permitido en toda la cuenca. Aunque estas figuras son preliminares, es clara la necesidad de redistribuir el agua en la cuenca, considerando al lago como un usuario que requiere de entre 380 y 490 Mm³ adicionales a los volúmenes anuales recibidos durante los últimos 25 años.

El segundo ejemplo toma en cuenta un caso de fuertes lluvias como las recientemente registradas, con un aumento importante en el volumen de agua en el lago. Esta simulación inicia con un volumen de 3 800 Mm³. Para llegar al volumen de “equilibrio” de 2 500 Mm³ se puede aceptar un déficit inicial en el balance de agua para el lago, de 225 Mm³.

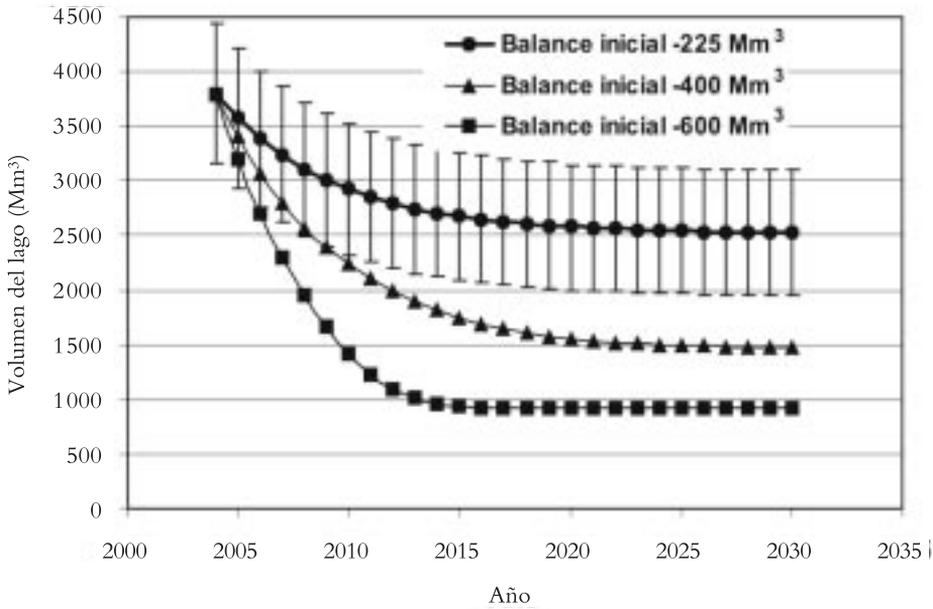


FIGURA 9. Simulación de la reducción en el volumen de agua en el lago de Chapala bajo diferentes escenarios de manejo. Las barras (balance inicial -225 Mm^3) representan las variaciones estimadas del volumen (máximos y mínimos) para cada año.

Considerando que este nivel inicial es resultado de una época de lluvias excepcionales, se esperaría que el déficit observado en el año posterior fuese mayor. La diferencia entre el déficit tolerable (obtenida con esta modelación) y el real (debido a la sobreexplotación del agua), refleja el volumen necesario para el lago, que permite alcanzar el nivel meta a largo plazo, es decir un promedio anual de $2\,500 \text{ Mm}^3$. El déficit tolerable debe actualizarse anualmente, tomando en cuenta las variaciones debido a cambios climáticos, trasvases y otras diferencias en el manejo del agua en toda la cuenca. En esta forma, la herramienta facilita el control del “sistema de frenado” con una anticipación de 5 a 10 años.

Estos ejemplos demuestran muy claramente que aún cuando el nivel de agua en el lago se encuentra relativamente alto debido a lluvias excepcionales, no se deben incrementar las extracciones y con ello disminuir las entradas al lago. Al contrario, no cambia la necesidad de agua para el lago como “usuario”. La única ganancia es que incrementos excepcionales en los niveles de agua en el lago, ofrecen más tiempo disponible para tomar decisiones adecuadas, que no sean de emergencia como los trasvases, cuando los niveles del lago bajan.

Se debe enfatizar que aún con el nivel alto después de las lluvias fuertes en el 2003, es necesario reducir las extracciones y, de esta manera, suministrar más agua al lago, si la decisión es mantener al lago saludable.

DISCUSIÓN

La presente situación de toda la Cuenca Lerma-Chapala puede clasificarse como seriamente desequilibrada. Como se concluyó por Hansen y van Afferden (2001b) gran parte de la cuenca tiene clima semiárido, con lluvias temporales durante algunos meses cada año. Las fluctuaciones hidro-meteorológicas contribuyen a la recurrente disminución en la disponibilidad del agua. Asimismo, el mayor volumen de agua asignado es para riego agrícola con muy baja eficiencia. Aunado a esto, el precio del agua, aún cuando poco a poco se ha incrementado, no fomenta medidas del uso eficiente del agua entre los usuarios. Importantes cantidades de agua son transferidas a las cuencas circundantes para el suministro de las ciudades de México y Guadalajara. Estos volúmenes no regresan a la cuenca como aguas residuales tratadas.

Los cambios en el uso de suelos forestales por desarrollos agrícolas y urbanos, causa erosión y consecuente pérdida de capacidad de almacenamiento del agua. Adicionalmente, en la región superior del Lerma la agricultura temporal es practicada con poca tecnología en pendientes empinadas, con vegetación limitada y delimitación deficiente de las terrazas. La calidad del agua se deteriora a la par de una incompleta cobertura de plantas de tratamiento de aguas residuales, falta de mecanismos de control, compromisos voluntarios, mercados internacionales, coordinación entre autoridades, monitoreo, participación ciudadana y educación ambiental.

La estructura social en la cuenca no facilita la implementación de restricciones en el uso del agua ya que existen grupos de bajos recursos, que dependen de los bajos costos de agua para riego. El tamaño de la cuenca y el hecho de que parcialmente incluye cinco estados, hace la coordinación del manejo del agua una tarea muy complicada. La estructura social complica un manejo integral del agua así como la integración vertical y horizontal y la participación de los usuarios e instituciones en las políticas de distribución del agua, tanto en el ámbito local como regional.

Para un desarrollo sustentable de la cuenca, en los sentidos tanto económico como productivo, debe aceptarse que el agua no es un recurso ilimitado. Por otro lado, el potencial para el uso de agua, el cual aún falta por explorar, es suficiente para mantener la productividad y usos existentes y garantizar la preservación ecológica en la cuenca.

El manejo de una cuenca es un proceso continuo e iterativo. Para establecer mecanismos de seguimiento en la solución de la problemática, se requiere contar con suficientes datos confiables. Por otro lado, el control del cumplimiento de las acciones tomadas también debe ser medible. De esta manera, el manejo adecuado del agua en una cuenca debe basarse en sistemas de información actualizada, usos adecuados de los resultados para la toma de decisiones y ajustes continuos de las acciones.

La herramienta presentada en este capítulo podría formar parte de este sistema de retroalimentación. Adicionalmente, relacionado a los problemas más actuales arriba mencionados, se requiere contar con un diagnóstico que incluye la información hidrológica actualizada y geográficamente representativa. Esto debe incluir lluvias, evaporaciones, escurrimientos e infiltraciones, volúmenes extraídos para los diferentes usos, datos de economía productiva, ecológicos y sociales, erosión y contaminación por fuentes tanto puntuales como dispersas.

Las acciones correctivas en el manejo del agua en la cuenca, basadas en los datos continuamente obtenidos, deben incluir la identificación y aplicación de mecanismos e instrumentos que permitan romper el desequilibrio hidrológico y ecológico. Algunas de estas acciones son: adaptación de leyes, reorganización de la participación social e institucional, tecnificación y modernización de la infraestructura de riego así como la mejora y construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, reforestación y programas de conservación de los suelos. Por último, las responsabilidades en el sector agua deben definirse en todos los niveles, incluyendo no sólo el seguimiento sino también el control y las sanciones.

REFERENCIAS

- Afferden, M. van y A.M. Hansen, 2004, "Forecast of lake volume and salt concentration in Lake Chapala, Mexico", aceptado para su publicación en *Aquatic Sciences*.
- Aguilar, E., 2003, *Comunicación personal*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Aparicio J., 2001, *Hydrology of the Lerma-Chapala Watershed. The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and Management*, Hansen, A.M. y M. van Afferden (eds.), Kluwer Academic/Plenum Publishers, Cap. 1, pp. 3-30.
- Ayla Jay, J. y T. Ford, 2001, *Water Concentrations, Bioaccumulation, and Human Health Implications of Heavy Metals in Lake Chapala, The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and Management*, Hansen, A.M. y M. van Afferden (eds.), Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001, Cap. 5, pp. 123-136.
- CCME, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life In Canadian Environmental Quality Guidelines*, No. 1299, Winnipeg (ISBN 1-896997-34-1).

- CNA, 1989, Comisión Nacional del Agua, "Criterios Ecológicos de Calidad del Agua", *Diario Oficial de la Federación*, 13 de diciembre.
- CNA, 1999, Comisión Nacional del Agua. El Consejo de Cuenca Lerma-Chapala 1989-1999, *10 años de trabajo a favor de la gestión integral y manejo sustentable del agua y de los recursos naturales de la cuenca*, Guadalajara, México.
- CNA, 2003, Comisión Nacional de Agua, *Diagnostico de la Región Lerma Santiago Pacífico (Lago de Chapala)*, <http://www.redagua-lsp.org.mx/esp01/cuenca/cuenca.htm>.
- CNA-IMTA, 2000, Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas). Hidrometría y Sedimentos hasta 1999*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- EPA, 2001, Agencia para la Protección Ambiental de América del Norte, EPA-822-R-01-2001. EUA.
- Filonov, A.E., I.E. Tereshchenko y C.O. Monzón, 2001, *Hydro-meteorology of Lake Chapala*. En *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and Management*, Hansen, A.M. y M. van Afferden (eds.), Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 151-182.
- González-Hita, L., 1999, *Localización y evaluación de agua subterránea en el Lago de Chapala*, Informe técnico, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- González-Hita, L., L.F. Sánchez-Díaz, I. Mata-Arellano, G. Ortiz-Flores y M. Hofmann, 1993, *Estudio Hidrogeoquímico e Isotópico de la Zona de Toluquilla, Ocotlán-La Barca en el estado de Jalisco*, Informe técnico, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Hansen, A.M. y M. van Afferden, 2001a, *Toxic Substances, Sources, Accumulation, and Dynamics*. En *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and Management*, Hansen, A.M. y M. van Afferden (eds.), Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 95-121.
- Hansen, A.M. y M. van Afferden, 2001b, *Summary and Conclusions*. En *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and Management*, Hansen, A.M. y M. van Afferden (eds.), Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 373-377.
- Hansen, A.M. y M. van Afferden, 2004, "Modeling Cadmium Concentration in Water of Lake Chapala, Mexico", aceptado para publicación en *Aquatic Sciences*.
- León-Mojarro, B. de, R. Medina-Mendoza y A. González-Casillas, 2001, "Natural Resources Management in the Lerma-Chapala Basin", en Hansen, A.M. y M. van Afferden (eds.), *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and Management*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 59-92.
- Lind, O.T. y L. Dávalos-Lind, 2001, "An Introduction to the Limnology of Lake Chapala, Jalisco, Mexico", en Hansen, A.M. y M. van Afferden (eds.), *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and Management*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 139-149.
- Scott, C.A., P. Silva-Ochoa, V. Florencio-Cruz y P. Wester, 2001, "Competition for Water in the Lerma-Chapala Basin", en Hansen, A.M. y M. van Afferden

- (eds.), *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and Management*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 291-323.
- SSA, 2000, Secretaría de Salud, "Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización", Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, *Diario Oficial de la Federación*, octubre 20, pp. 1-8.
- Wester, P., R. Melville y S. Ramos-Osorio, 2001, "Institutional Arrangements for Water Management in the Lerma-Chapala Basin", En Hansen, A.M. y M. van Afferden (eds.), *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and Management*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 343-369.
- Zárate-del Valle, P.F., M. Francois, C. Parrón, G. Solana-Espinoza, I. Israde-Alcántara, H.U. Ramírez-Sánchez y F. Fernex, 2001, "Geology, sediments and soils", en Hansen, A.M. y M. van Afferden (eds.), *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and Management*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 31-57.

INDUCCIÓN DE AGUA TERMAL PROFUNDA A ZONAS SOMERAS: AGUASCALIENTES, MÉXICO

Joel Carrillo Rivera, Antonio Cardona y Thomas Hergt

PRESENTACIÓN

La calidad del agua subterránea obtenida en el centro y centro-norte, en terrenos volcánicos de México, ha cambiado en las últimas décadas: el cambio ha sido inducido en pozos de extracción para agua potable con la presencia de agua con más, o con menos, mineralización, pero con mayor concentración de elementos traza (*i.e.* fluoruro). Información apunta que la temperatura del agua involucrada ha aumentado de 30 a 50°C (a la descarga en pozos) independientemente de su contenido total de sales. Perforaciones realizadas desde los años cuarenta extraían agua con temperatura elevada, sin embargo, se ha incrementado la extensión de las áreas donde la temperatura ha aumentado en las últimas décadas. Estudios básicos indican que el control del flujo del agua subterránea es a través de fosas tectónicas desarrolladas en rocas ácidas a intermedias con unos 1 500 m de espesor. No existe relación de la profundidad de los pozos con la temperatura del agua extraída, pero si se observa una relación temperatura–profundidad en mediciones efectuadas en zonas fracturadas. La característica libre del acuífero permite condiciones redox oxidantes que implican la presencia de hierro y manganeso en bajas cantidades. La geotermometría indica una temperatura mínima a profundidad de aproximadamente 90°C. El agua está en equilibrio con la calcita, fluorita y calcedonia, aunque se presume la pérdida de algo de fluoruro en el proceso de extracción del agua. Las condiciones de flujo de agua subterránea se verifican por medio del aforo e interpretación del comportamiento hidrogeoquímico del agua extraída por el pozo San Ignacio; en éste se establece la entrada de flujo de agua termal y la participación de otro flujo de agua fría identificado al inicio de la prueba. Esto se interpreta como que el agua fría (sistema local) suprayacente sólo está asequible por pocos minutos (y en reducido volumen). Para aspectos prácticos, el agua fría esta restringida en pocas decenas de metros de espesor y la termal se infiere representaba un espesor de más de 1 000 m. Los resultados sugieren que el espesor de agua fría ha cambia-

do debido a la extracción a que ese sistema ha sido sujeto así como al abatimiento acumulativo del nivel freático. Esta respuesta se hace evidente con el aumento de temperatura registrado en otros estudios y en la prueba de bombeo realizadas para este trabajo. Extracciones futuras incrementarán el efecto de ascenso del agua termal y sus resultados negativos en la calidad del agua extraída.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la ciudad de Aguascalientes ha incrementado su actividad industrial y paralelamente el número de habitantes que requiere servicio de agua potable en un monto conjunto estimado en $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Es de anotar que para 1992, en la franja central del Estado (al centro de la cual está la ciudad) se extraía un caudal estimado en $13.7 \text{ m}^3/\text{s}$. Cada día es mayor el caudal de agua subterránea que se extrae por medio de pozos para cubrir la creciente necesidad de agua, se estima que en 1996 se extraía un aproximado de $16.8 \text{ m}^3/\text{s}$. Además, se continúa con la perforación de nuevos pozos para reponer aquellos cuya vida útil ha terminado.



FIGURA 1. Localización del pozo San Ignacio.

De este modo, a finales de marzo de 1998 se terminó de perforar un nuevo pozo con 550 m de profundidad, denominado pozo San Ignacio, ubicado al occidente de la ciudad de Aguascalientes (figura 1). El diseño de su prueba de aforo fue diferente a lo tradicional, ya que se deseaba observar la evolución de ciertos parámetros físicos y químicos con relación al: *i*) caudal obtenido y *ii*) tiempo de extracción. A grandes rasgos, el aforo consistió en dos fases. En la primera el caudal de extracción se incrementó paulatinamente en cinco etapas de siete horas de duración cada una. En la segunda, el caudal disminuyó en forma paulatina en cuatro etapas de tres horas de duración cada etapa.

OBJETIVOS

Es conocido localmente que en la ciudad de Aguascalientes, una porción del agua que se extrae del subsuelo, presenta concentraciones de fluoruro (F) por arriba del valor recomendado para agua potable. Sin embargo, cuando se perforan nuevos pozos con fines de abastecimiento de agua a la población, no es común que se incluya en su diseño, construcción y operación criterios que conduzcan a obtener: *i*) un funcionamiento hidráulico eficiente (buena relación entre el caudal y el abatimiento) de acuerdo con las características del acuífero y *ii*) una calidad de agua adecuada para el uso al que se desea destinar.

Aunque existe cierta preocupación por un funcionamiento hidráulico, sin embargo, el criterio de calidad del agua no es normalmente tomado en cuenta, ya que no existe una metodología específica o técnica que indiquen como incluirlo en el análisis de la prueba de aforo. En este respecto, algunos trabajos realizados previamente en los estados de Aguascalientes y San Luis Potosí (IGF, 1995; Cardona y Carrillo-Rivera, 1995), sugieren la posibilidad de incorporar ciertos controles químicos naturales para limitar las concentraciones del fluoruro disuelto en el agua subterránea durante su extracción en pozos profundos.

Consecuentemente, los principales objetivos de este trabajo incluyen: *i*) investigar la evolución hidrogeoquímica en el agua subterránea extraída durante el aforo para definir los flujos de agua involucrados, con especial atención al fluoruro y, *ii*) definir en la medida de lo posible, reacciones y procesos químicos que condicionan dicha evolución. Se considera que la cabal consideración de estos objetivos, permite definir una metodología para controlar en forma natural la calidad del agua subterránea en medios geológicos similares.

MÉTODOS

Toma de muestras de agua subterránea

Con la finalidad de obtener información relativa a la evolución temporal del fluoruro en el agua subterránea, se realizó la toma de muestras de agua a intervalos predeterminados, relacionados con las diferentes etapas del aforo. En cada tiempo de muestreo se tomó agua en una botella de polietileno de 250 ml de capacidad. En forma paralela se realizó la medición de parámetros de campo en una celda de aislamiento: *i*) temperatura, *ii*) pH, *iii*) potencial de óxido-reducción (Eh), *iv*) conductividad eléctrica (CE). La celda de aislamiento limita la interacción del agua subterránea con la atmósfera, evitando en gran medida que la muestra disuelva oxígeno y libere dióxido de carbono (previo a la medición), pues al realizarse la interacción entre el agua subterránea y la atmósfera las lecturas de pH, Eh y CE no representarían las condiciones del agua a profundidad en el acuífero. En lo que respecta al medidor de pH, se calibró con soluciones tampón de pH conocido llevándolas a la misma temperatura del agua subterránea.

Además de la información anterior y para investigar a detalle la química del agua subterránea, se tomaron siete muestras para análisis químico (elementos mayores y traza). Debido a que la alcalinidad cambia rápidamente, se midió en campo (por duplicado) en cada muestra, utilizando la técnica estándar de titulación con HCl a 0.02N, con alícuotas de 25 ml y fenoftaleína y verde de bromocresol como indicadores de los puntos de equivalencia. Adicionalmente, para análisis de elementos mayores y traza, se tomaron muestras en frascos de polietileno (prelavados en laboratorio en solución de ácido clorhídrico y agua destilada) de 1/2 litro de capacidad, con tapa y contratapa.

En un frasco de 1/2 litro se tomó una muestra sin filtrar (muestra 1). Se evitó la permanencia de burbujas en el seno del líquido. Otra muestra (muestra 2), se filtró en campo utilizando una membrana de acetato de celulosa de 0.45 mm y para evitar precipitación y adsorción de elementos en las paredes de la botella, se acidificó a un pH2 con ácido nítrico de alta pureza.

Inmediatamente después de la toma, las muestras se colocaron en recipientes con hielo en su interior, manteniendo su temperatura alrededor de 4°C durante el transporte al laboratorio. Las muestras 1 y las de fluoruro se remitieron a laboratorios del Departamento de Química de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA). Las muestras 2 se enviaron al laboratorio de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP).

Medición de abatimiento y caudal de extracción

Durante la prueba de aforo se registró la variación de profundidad al nivel dinámico en el pozo, con respecto al tiempo de extracción. La medición de la

profundidad al nivel dinámico se realizó de acuerdo como lo señalan en manuales técnicos de pruebas de bombeo, a tiempos cortos al inicio de cada escalón de tiempo (alrededor de 15 mediciones en la primera media hora), incrementando, posteriormente, el tiempo entre mediciones. La profundidad al nivel del agua en el pozo se evaluó por medio de una sonda eléctrica calibrada, que se introdujo en un conducto colocado expresamente con este fin cuando se construyó el pozo.

El caudal de extracción se determinó por medio de la técnica del orificio calibrado con tubo piezométrico. El orificio consistió de una abertura redonda en el centro de una placa circular de acero, aditamento que se colocó dentro del tubo de descarga. Sobre la tubería de descarga y a 0.60 cm de la placa circular, se encontraba un orificio ubicado en el plano coincidente con el diámetro horizontal de la tubería, al que se le adaptó un tubo de plástico que se colocó en forma vertical para que funcione como piezómetro. La fórmula utilizada para calcular del caudal de extracción es la siguiente:

$$Q = 4.43 KA \sqrt{h}$$

donde, Q es el caudal de extracción (m^3/s); A , el área del orificio (m^2) y h es la altura de agua en el piezómetro (m). El valor de K depende de la relación entre los diámetros de la tubería de descarga y del orificio.

MARCO GEOLÓGICO Y ESTRUCTURAL

La porción central de México comprende una amplia región de las denominadas Provincias Fisiográficas de la Mesa Central y el Eje Neovolcánico, y consiste en su mayor parte de un territorio con clima semiárido, que incluye parcialmente los estados de Jalisco, Hidalgo, Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro. Se estima que en los últimos cinco estados, el funcionamiento hidrogeológico de los sistemas de flujo que se desarrollan en dichas Provincias Fisiográficas es similar, ya que comparten condiciones geológicas, estructurales, topográficas y climáticas análogas. Entre los aspectos geológicos más conspicuos de esta demarcación, destacan la distribución regional de unidades geológicas compuestas por rocas volcánicas de edad Terciaria. En la figura 2 se presenta la distribución de afloramientos de rocas volcánicas Terciarias en el territorio Mexicano, que litológicamente abarcan derrames lávicos, ignimbritas y tobas.



FIGURA 2. Distribución de rocas volcánicas terciarias en la República Mexicana.

Las rocas presentes en el área de interés son félsicas con textura porfírica en una matriz vítrea (Aranda-Gómez *et al.*, 1989; Nieto-Samaniego *et al.*, 1996). El basamento de la cubierta Cenozoica está constituido por rocas sedimentarias denominadas informalmente como Basamento Mesozoico, aunque en algunos lugares se detectan cuerpos intrusivos graníticos. El espesor conjunto de las rocas volcánicas Terciarias es del orden de 1 500, llegando en casos a los 2 000 m. En la figura 3 se presenta un mapa geológico de la región (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997), donde se constata la distribución regional de rocas volcánicas Cenozoicas.

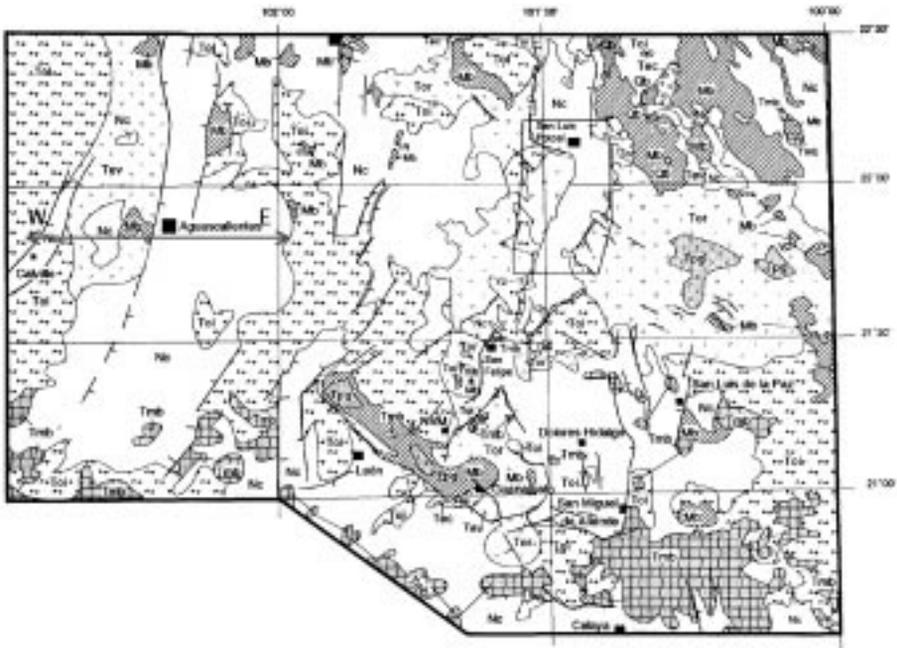


FIGURA 3. Mapa geológico de la región de Aguascalientes. (Qb) Basalto Cuaternario, (Nc) Sedimento continental Neogénico, (Tmb) Basalto Miocénico, (Toi) Ignimbrita Oligocénica, (Tor) Domos Riolíticas Oligocénicas, (Tev) Roca volcánica Eocénica, (Tec) Sedimento continental Eocénico, (Tpg) Granito Paleocénico, (Mb) Basamento Mesozoico. (Adaptado de Nieto-Samaniego *et al.*, 1997)

Adicionalmente, desde el punto de vista estructural se ha detectado la presencia de numerosas fallas que afectan la cubierta volcánica Terciaria de la Mesa Central y rocas más antiguas (Tristán-González, 1986; Nieto-Samaniego *et al.*, 1997). La presencia de tectonismo de tipo extensional a partir del Eoceno-Oligoceno está estrechamente relacionada con el volcanismo y ha sido documentada en varias investigaciones (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997; Aranda-Gómez *et al.*, 1989; Tristán-González, 1986). Los lineamientos mayores presentan direcciones N-S, NE-SW y NW-SE, que dieron lugar a numerosas fosas y pilares tectónicos distribuidos a lo largo de la región. Estructuras principales como las fosas tectónicas de Aguascalientes, Villa de Reyes-SLP (NE-SW) y la del Bajío (NW-SE) presentan hundimientos máximos del orden de 900 m (Jiménez-Nava, 1993), 500 m (Tristán-González, 1986) y 900 m (Hernández-Laloth, 1991), respectivamente. Dichas fosas tectónicas están rellenas por sedimentos continentales con edad que abarca desde el Terciario medio hasta el Reciente, así como por rocas volcánicas (tobas e ignimbritas principalmente) cuyo espesor conjunto generalmente es de entre 200 y 500 m (figura 4).

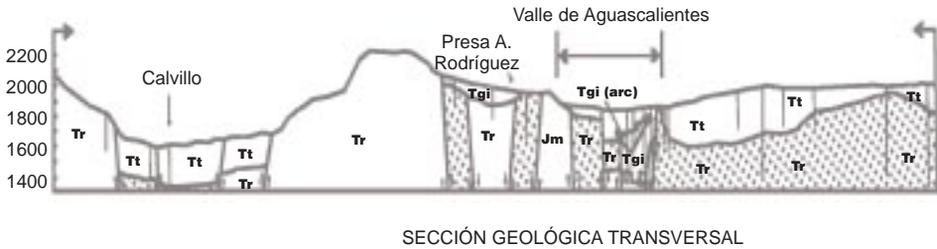


FIGURA 4. Sección geológica, zonas Calvillo-Aguascalientes. (Jm) Basamento Mesozoico, (Tr) Rocas volcánicas terciarias, (Tt) Tobas y sedimentos arcillo-arenosos del Terciario, (Tgi) Terciario granular indiferenciado. Ubicación de la sección geológica en la figura 3.

HIDROGEOQUÍMICA

Examen de resultados de los análisis químicos

La relativa exactitud de los resultados de los análisis químicos, se evaluó usando la técnica del balance iónico o condición de electroneutralidad. El total de cargas de aniones y cationes calculados con base en los resultados de laboratorio, debe ser igual o al menos muy similar. El total de cargas positivas y negativas se obtiene sumando los equivalentes de aniones y cationes, respectivamente. El error de balance iónico se expresa por la diferencia, como un porcentaje de la suma, de acuerdo con lo siguiente:

$$\text{Error (\%)} = [(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}) / (\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})] \times 100\%$$

Los errores calculados con el procedimiento anterior para los resultados de los análisis practicados en la UAA, fueron mucho mayores que los máximos permisibles. Los resultados analíticos provenientes de la UASLP fueron mejores aunque son un poco mayores de 5% (máximo recomendado en la literatura de acuerdo con la salinidad de la muestra), lo que se considera aceptable, sobre todo si se toma en cuenta que el cloruro y sulfato utilizados para el cálculo del porcentaje de error, fueron los datos proporcionados por la UAA. Estos errores son sistemáticamente positivos, por lo que se infiere que los resultados de cloruro y sulfato, son un poco mayores que los valores reales.

Evolución de parámetros físicos y químicos con el tiempo de extracción

En la figura 5 se presenta la evolución de diversos parámetros físicos y químicos con relación al tiempo de extracción. La temperatura del agua subterránea a la descarga del pozo, tiene una clara tendencia de incremento desde el inicio de la prueba hasta los 1 800 minutos, aproximadamente. A partir de este punto, disminuye la tendencia de incremento aunque no desaparece por completo. En for-

ma paralela, el litio y sodio (figuras 5 y 6, respectivamente) presentan una tendencia de incremento en esa primera fase del aforo para mantenerse relativamente estables en la fracción restante de la prueba. A diferencia de estos, el sulfato (figura 6) inicia el comportamiento estable a los 1 260 minutos de extracción.

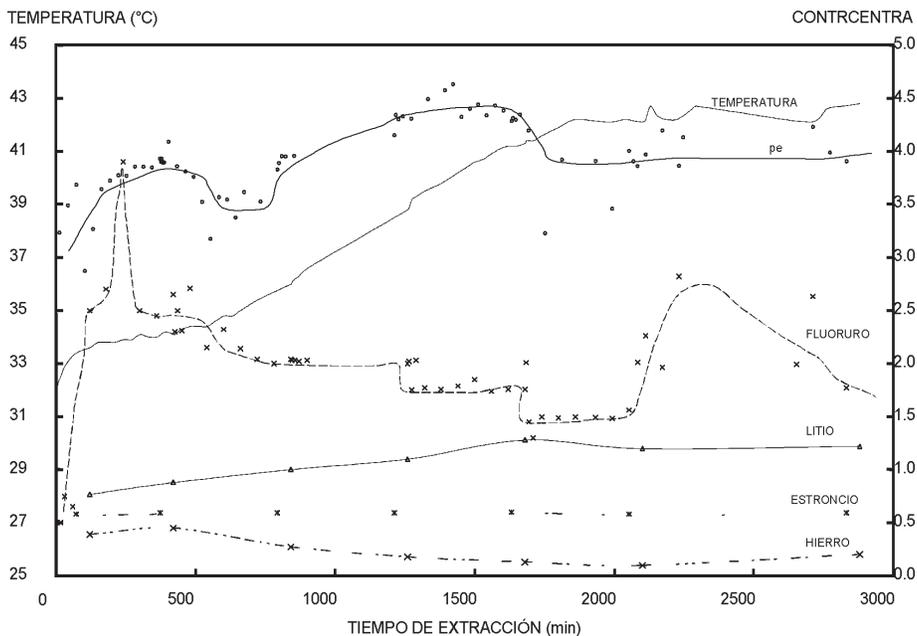


FIGURA 5. Evolución de parámetros fisicoquímicos con el tiempo de extracción.

El contenido de bicarbonato (figura 6) tiende a incrementarse durante toda la prueba, en contraste con el valor del pH que disminuye en forma gradual con un pequeño aumento que coincide con la segunda fase de la prueba. En discrepancia, la concentración de especies como el calcio, silicio y estroncio tienden a mantenerse en forma relativamente estable. Los dos primeros muestran una pequeña evolución en relación con el caudal de extracción, disminuyen cuando el caudal se incrementa y aumentan cuando la extracción se reduce.

Dos especies merecen especial atención en relación con las Normas de Calidad de Agua para uso potable. Las concentraciones de fluoruro y hierro registrados a lo largo de la prueba presentan algunos valores mayores a los límites máximos recomendados (1.5 y 0.3 mg/L, respectivamente). De acuerdo con la gran cantidad de muestras de agua que se tomaron para determinaciones de fluoruro, se detecta una marcada relación de la concentración de este ion con el caudal de

extracción (figura 5). En general, la cantidad de fluoruro disminuyó progresivamente con relación al incremento del caudal de extracción (primera fase) y posteriormente se incrementó en la segunda fase de la prueba de aforo cuando el caudal de extracción disminuyó.

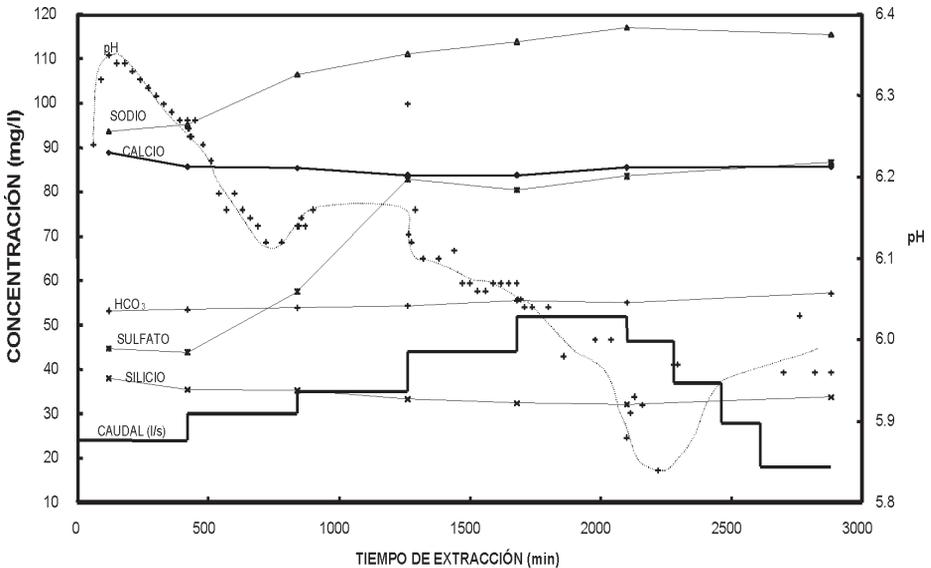


FIGURA 6. Evolución de parámetros químicos con el tiempo de extracción con relación al caudal obtenido durante la prueba de aforo.

Aunque para el caso del hierro las concentraciones máximas registradas no son mucho mayores que la establecida en las Normas de Calidad del Agua, la tendencia es relativamente similar a la que presenta el fluoruro.

Definición de reacciones y procesos químicos

De acuerdo con la evolución de la química del agua subterránea, observada durante el aforo del pozo San Ignacio, se infiere la presencia de reacciones y procesos químicos, que se presentan debido a la acción de la extracción, que modifica temporalmente la composición del agua subterránea obtenida, ya que se produce una mezcla de agua proveniente de diferentes niveles en la vecindad del pozo, proceso que se infiere condiciona la variación química detectada. En forma paralela, se supone la presencia de controles de solubilidad que gobiernan la concentración de algunas de las especies disueltas.

Trabajos previos (IGF, 1994; IGF, 1995; Cardona, 1997) reconocen la presencia de diferentes sistemas de flujo subterráneo en el estado de Aguascalientes, cada uno con características físicas y químicas propias. Los pozos para extracción

de agua en el estado, tienen una gran longitud de ademe ranurado que permite la entrada de agua durante la extracción. Esta situación facilita, en condiciones hidrogeológicas favorables, la captación de diferentes sistemas de flujo presentes en la vertical, y permite la mezcla entre aguas de diferente composición química. De acuerdo con las dimensiones del pozo, las unidades geológicas atravesadas por el mismo y los mecanismos de flujo involucrados, la mezcla se dará en el interior del pozo, en la zona acuífera en la vecindad del pozo, o en ambos.

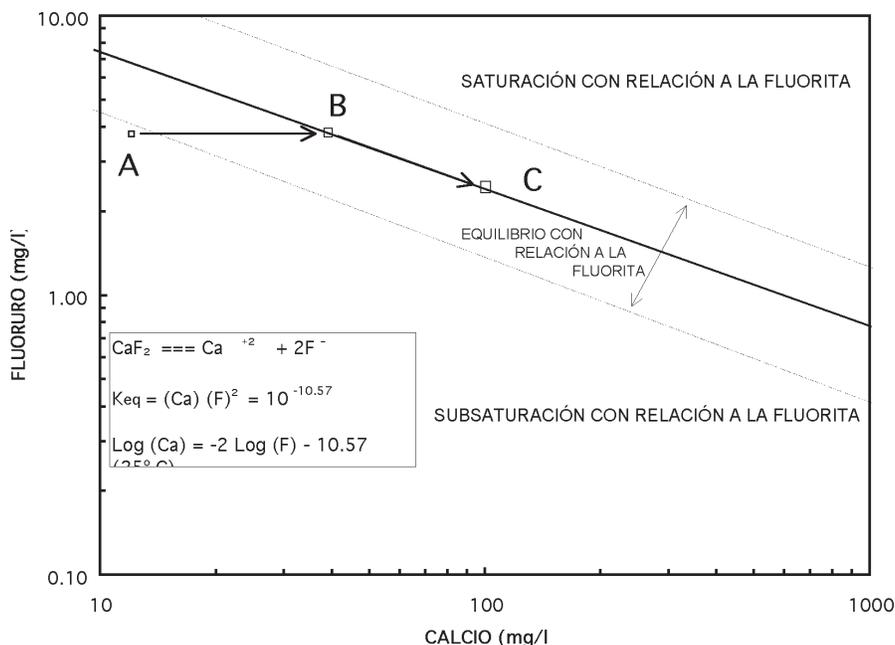


FIGURA 7. Diagrama de estabilidad para la fluorita.

Para investigar posibles controles de solubilidad en relación con diferentes fases minerales, se utilizó el modelo geoquímico de transferencia de masa PHREEQC (Parkhurst, 1995). El índice de saturación se define comparando los productos de actividad iónica (PAI) con productos de solubilidad, o constantes de equilibrio (K_{eq}) para la reacción analizada. El PAI se calcula a partir de las actividades de los iones involucrados y de las relaciones establecidas a partir de la reacción de disolución del mineral. Los índices de saturación (LogPAI/K_{eq}) se utilizan para determinar si el agua subterránea está en equilibrio ($\text{LogPAI}/K_{eq} \pm 0.05 \cdot \text{Log}K_{eq}$), sobresaturada ($\text{LogPAI}/K_{eq} > 0.05 \cdot \text{Log}K_{eq}$) o subsaturada ($\text{LogPAI}/K_{eq} < 0.05 \cdot \text{Log}K_{eq}$) con relación a determinado mineral.

Para ejemplificar como funciona un control de solubilidad, en el caso de la fluorita (CaF_2), se presenta la figura 7. Si a una muestra de agua que de acuerdo con su concentración de calcio y fluoruro, se ubica en el punto *A*, se le adiciona calcio (por reacción con calcita, por ejemplo), entonces la evolución de su composición será en dirección del punto *B*, donde se encontrará en equilibrio en relación con la fluorita. Una mayor disolución de calcita, producirá que se precipite fluorita con lo que disminuirá la concentración del fluoruro disuelto en esa muestra (punto *C*). La zona de equilibrio señalada está ejemplificada por la región ($\pm 0.05 \text{ Log}K_{\text{eq}}$) donde, para efectos prácticos, se considera que el agua está en equilibrio con la fase en cuestión.

Mezcla de aguas

De acuerdo con la evolución de la temperatura del agua extraída, y de su contenido de litio y sodio (figuras 5 y 6, respectivamente), se infiere la presencia de mezcla de aguas de al menos dos grupos extremos de características químicas diferentes. Uno de ellos, es agua termal (42-43°C a la descarga) con elevado contenido de litio (1.28 mg/L) y sodio (117 mg/L), que fueron caracterizados químicamente durante el aforo; este grupo se considera representado por agua extraída a partir de 1 800 minutos después que se inició la prueba. Su composición química (elementos mayores y traza), temperatura y pH sugiere que se trata de agua de un sistema de flujo regional, que circula por rocas volcánicas que, de acuerdo con las condiciones geológicas definidas, están fracturadas.

Las condiciones de la prueba y los detalles de construcción del pozo, no permitieron identificar el otro miembro extremo. Sin embargo, se infiere que a diferencia del miembro extremo termal, esta componente tiene menor temperatura (del orden de 25-28°C). Este miembro extremo se estima que tiene influencia en el agua extraída durante la primera hora, pero se reconoce que participa una proporción no conocida de agua termal.

El IGF (1994) reporta la composición química del pozo de agua potable San Felipe (tabla 1) que tiene 235 metros de profundidad y que se encuentra muy cerca del entronque de la carretera a Villa Hidalgo (unos 2.5 km al occidente del pozo San Ignacio). Las características fisicoquímicas del agua extraída en el pozo San Felipe se consideran semejantes a las obtenidas durante los primeros minutos de extracción en el pozo San Ignacio, y son compatibles con un sistema de flujo intermedio, por lo que en forma preliminar se considerará que esta agua representa el segundo miembro extremo. Así, considerando al litio y sodio como conservativos se establecieron en forma aproximada los porcentajes de cada uno de los miembros extremos.

TABLA 1
DATOS Y FISCOQUÍMICOS PARA EL AGUA DEL POZO SAN FELIPE (IGF, 1994)

		<i>pe</i>	7.00	Na^+	57.82
		<i>STD</i>	427.00	K^+	16.61
<i>Temp.</i>	25.60	HCO_3^-	334.00	Ca^{+2}	60.30
<i>C.E.</i>	610.00	Cl^-	11.90	Mg^{+2}	12.10
<i>pH</i>	6.99	SO_4^{-2}	29.80	SiO_2	57.80
<i>Eh</i>	415.00	F^-	1.40	Li^+	0.09

Una mezcla binaria para elementos conservativos puede ser descrita a través de la siguiente ecuación:

$$Ax + B(1-x) = C$$

donde *A* puede representar la concentración del ion en el miembro extremo termal, *B* la del ion en el otro miembro extremo (agua del pozo San Felipe), *C* el valor en la mezcla (obtenida en el aforo) y *x* el porcentaje del miembro extremo *A* en la mezcla *C*.

La tabla 2 presenta diferentes porcentajes de mezcla calculados para el sodio y litio. En general existe una adecuada aproximación en los valores calculados en forma independiente para cada una de las muestras, lo que permite considerar como confiables a los resultados obtenidos. En la muestra 1, colectada a los 120 minutos de iniciada la extracción, el porcentaje de agua termal presente en la mezcla es del orden de 60% incrementándose paulatinamente hasta 100% para el caudal máximo de extracción durante la prueba. Una condición importante es que la disminución del caudal de extracción (de 52.3 a 18.0 L/s), no ocasiona un decremento significativo en la proporción del agua termal presente en la mezcla (mezcla 7). Al parecer, una vez establecido el mecanismo de flujo de entrada del agua termal, éste bloquea la irrupción de la componente de agua no termal que se manifestó en la primera parte de la prueba (muestras 1, 2, 3 y 4).

Controles de solubilidad

La evolución del ion fluoruro con relación al tiempo de extracción sugiere la presencia de un control de solubilidad en relación con algún mineral. De acuerdo con la figura 8, el decremento de fluoruro con el tiempo de extracción, pudiera explicarse si el agua estuviera en equilibrio con la fluorita y el calcio se incrementara paralelamente en dichas muestras. La figura 8 indica que las primeras dos muestras efectivamente se encuentran en equilibrio con la fluorita, pero posteriormente el agua se torna subsaturada con respecto a esa fase. Esto sucede debido a que disminuye la concentración de fluoruro, pese a que no se incrementa el calcio disuelto. Así, el control de solubilidad señalado no explica satisfactoria-

mente la evolución observada en el ion fluoruro. El índice de saturación para las muestras con respecto a la calcita presenta un comportamiento paralelo a aquel calculado para la fluorita. Esto indica que en las muestras subsaturadas con respecto a la fluorita, la concentración de calcio no está limitada por la solubilidad de la calcita.

TABLA 2
PORCENTAJES DE MEZCLA PARA CADA MIEMBRO EXTREMO

Sodio					Litio				
<i>A (termal)</i>	<i>B (no termal)</i>	<i>C (mezcla)</i>	%A	%B	<i>A (termal)</i>	<i>B (no termal)</i>	<i>C (mezcla)</i>	%A	%B
117.00	57.82	93.70	60.63	39.37	1.28	0.09	0.77	57.14	42.86
117.00	57.82	95.10	62.99	37.01	1.28	0.09	0.88	66.39	33.61
117.00	57.82	106.45	82.17	17.83	1.28	0.09	1.00	76.47	23.53
117.00	57.82	111.00	89.86	10.14	1.28	0.09	1.10	84.87	15.13
117.00	57.82	113.80	94.59	5.41	1.28	0.09	1.28	100.00	0.00
117.00	57.82	117.00	100.00	0.00	1.28	0.09	1.20	93.28	6.72
117.00	57.82	115.40	97.30	2.70	1.28	0.09	1.22	94.96	5.04

Otro mineral que potencialmente pudiera funcionar como un control de la concentración de fluoruro en el agua es el fluorapatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$). Sin embargo, no es posible calcular el índice de saturación con relación a este mineral, ya que no se dispone de la concentración de PO_4 disuelto. De acuerdo con los resultados de la aplicación del modelo PHREEQC se estima que la influencia de los complejos que incluyen fluoruro es mínima, ya que la mayor parte del fluoruro presente se encuentra como especie libre. Así, la información asequible no permite identificar plenamente las reacciones que controlan la evolución del fluoruro en la prueba.

Con relación a la evolución de la concentración de hierro, los resultados del modelo PHREEQC indican que las aguas colectadas están en equilibrio o sobresaturadas con respecto a las fases que contienen hierro más comunes en ambientes oxidantes de baja presión y temperatura, como son la magnetita ($\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$), goetita ($\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$), hidróxidos de hierro amorfos $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$. Existe una suave tendencia al aumento del parámetro p_e , hecho que sugiere que las condiciones se tornan ligeramente más oxidantes al final de la prueba, por lo que se infiere prevalece el control de solubilidad con respecto a óxidos e hidróxidos de hierro. El control de solubilidad con relación al carbonato hierro (siderita) no se considera factible, pues los índices señalan subsaturación con relación a este mineral.

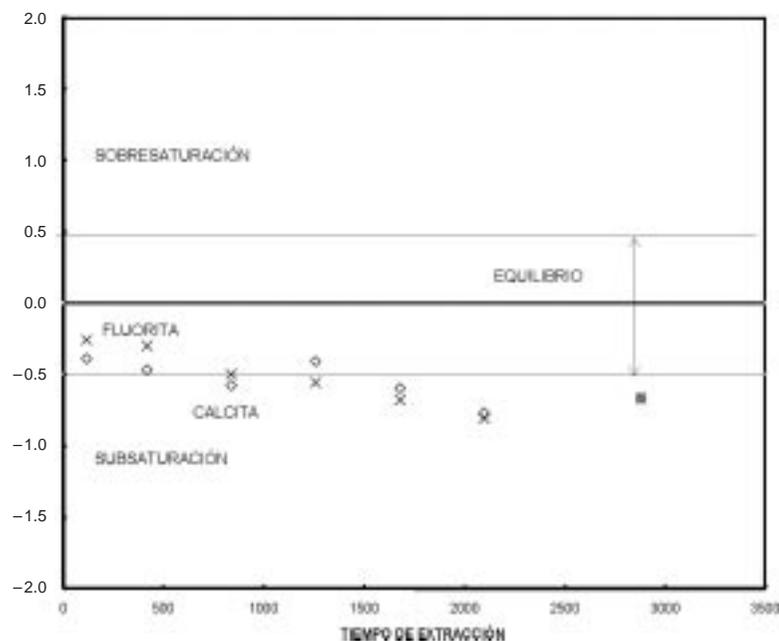


FIGURA 8. Evolución del índice de saturación con respecto a calcita y fluorita para las muestras de agua colectadas con el tiempo de extracción.

Geotermometría

Es un hecho que el agua termal que se extrae en el pozo San Ignacio (43°C a la descarga) se encuentra a mayor temperatura a profundidad en el sistema regional en el que circula; esto es, el agua pudo haber tenido temperaturas mayores a la registrada en la descarga. Los geotermómetros químicos son una técnica que se utiliza para investigar indirectamente la temperatura mínima de equilibrio a profundidad; como muchas otras técnicas en hidrogeología, el utilizar geotermómetros químicos requiere de algunos supuestos básicos:

1. las reacciones químicas a profundidad dependen de la temperatura
2. todos los constituyentes involucrados en una reacción agua-roca dependiente de la temperatura, son suficientemente abundantes
3. existe un equilibrio agua-roca a profundidad a la temperatura dominante
4. se presenta un pequeño o nulo reequilibrio o cambio en la composición a menor temperatura a medida que el agua fluye hacia la superficie
5. el agua no se mezcla con agua subterránea más somera.

Los geotermómetros cuantitativos se aplicaron a los análisis de las muestras de agua subterránea termal definida. Los geotermómetros incluyeron: 1) Geoter-

mómetro de sílice: calcedonia (Henley *et al.*, 1984), 2) Geotermómetro de Na-K-Ca (Fournier y Truesdall, 1973), 3) Geotermómetros de K/Mg_G (Gigenbach, 1988) y K/Mg_F (Fournier, 1990). Las fórmulas utilizadas son los siguientes:

Geotermómetro de Calcedonia

$$T = (1032 / (4.69 - \text{Log } C)) - 273.15$$

C = concentración de sílice en mg/L, T = temperatura de equilibrio °C.

Geotermómetro de Na-K-Ca

$$T = (1647 / ((\text{Log } \text{Na}/\text{K}) + b \text{ Log}((0.5\text{Ca}/\text{Na}) + 2.06) + 2.47)) - 273$$

T = temperatura de equilibrio °C. Las concentraciones de los cationes, están en mg/L. b es un coeficiente que depende de la temperatura de equilibrio. Para T < 100°C, b = 4/3; y para T > 100°C, b = 1/3.

Geotermómetro de K/Mg (Gigenbach)

$$\text{Log } (K_2Mg)_G = 14.0 - (4410/t)$$

las concentraciones son en mg/kilo, "t" es la temperatura de equilibrio.

Geotermómetro de (K₂/Mg) (Fournier)

$$103/t = 3.66 - 0.542 \text{log}(K_2/Mg) + 0.05751 (\text{log}(K_2/Mg))^2 - 0.002748 (\text{log}(K_2/Mg))^3$$

las concentraciones son en mg/kilo, "t" es temperatura de equilibrio.

Las solubilidades de algunos minerales como calcita y fluorita, pueden ser útiles en la estimación de las temperaturas de equilibrio en algunos sistemas geotérmicos. El principal problema que se tiene en la utilización de la solubilidad de la calcita como geotermómetro químico, es el relacionado con el desconocimiento del pH a profundidad (Mariner *et al.*, 1993).

En el presente trabajo se realizó la interpretación de los resultados de los geotermómetros de sílice para sistemas de baja entalpía, que incluye la determinación para el polimorfo calcedonia, la que al parecer controla la concentración de sílice disuelto. La calcedonia es un producto metaestable de la disolución y alteración de la matriz vítrea de las rocas volcánicas. Fournier (1981) indica que el geotermómetro de cuarzo trabaja mejor para temperaturas mayores a 150°C, y Arnósson (1975) demostró que en Islandia, la solubilidad del cuarzo controla la sílice disuelta a temperaturas mayores a 180°C, mientras que la calcedonia es el polimorfo apropiado, a temperaturas menores a 120°C. En la zona de estudio los valores del geotermómetro de cuarzo sin pérdida de vapor, rinden temperaturas de equilibrio del orden de 110°C (Molina, 1996). Todo lo anterior sugiere que las temperaturas de equilibrio del geotermómetro de calcedonia pueden ser más representativas de las condiciones naturales del agua termal obtenido a través del pozo San Ignacio.

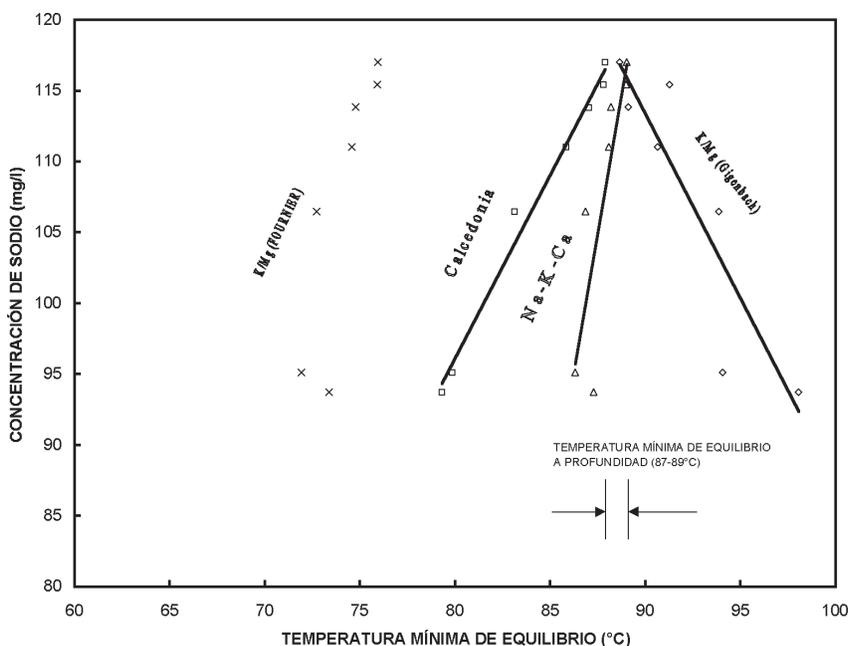


FIGURA 9. Resultados de la aplicación de los geotermómetros indicados en la gráfica.

Fouillac y Michard (1977) y Paces (1975) entre otros, han propuesto que existen problemas asociados con la aplicación del geotermómetro empírico de Na-K-Ca en aguas termales con alta presión de CO_2 . Considerando la temperatura a la descarga, la presión parcial de CO_2 calculada ($\text{PCO}_2=4.0\text{E}-01$ atm) para el grupo de aguas termales (Molina, 1996), es mayor que el reportado por Freeze y Cherry (1979) para aguas subterráneas “normales” ($1\text{E}-3.5$ a $1\text{E}-1.5$ atm). Sin embargo, los resultados para las últimas muestras colectadas sugieren que es factible se presenten condiciones que permiten su aplicación a ellas.

Los resultados del geotermómetro de K-Mg_G son congruentes con los de calcedonia y de Na-K-Ca. Giggenbach (1988) señala que este geotermómetro considera una gran velocidad de reequilibrio, por lo que de acuerdo con las temperaturas involucradas, sus resultados se pueden juzgar aceptables. Sin embargo, el geotermómetro de K/Mg_F es el que rinde sistemáticamente las menores temperaturas de equilibrio. Probablemente representa la mínima temperatura a profundidad, esto es puede estar acotando el extremo inferior de las temperaturas de equilibrio a profundidad.

Los resultados de aplicar los geotermómetros se presentan en relación con la concentración de sodio en la figura 9. Las temperaturas calculadas con los geotermómetros de calcedonia, Na-K-Ca y K/Mg_G convergen en una estrecha

zona, mientras que el de K/Mg_F se encuentra alejado de dicha región, sugiriendo una temperatura de equilibrio menor para las condiciones del pozo San Ignacio. La interpretación del comportamiento de los tres primeros geotermómetros, es congruente con la presencia de la mezcla de agua entre los sistemas de flujo regional e intermedio deducida previamente. En efecto, uno de los principales fundamentos para la aplicación de los geotermómetros, es que no existe mezcla de aguas (punto 5), cuando esto ocurre, no funcionan adecuadamente, por lo que las temperaturas que producen no son las buscadas.

La convergencia arriba indicada de los geotermómetros a un estrecho intervalo de temperaturas, implica que la mezcla entre los miembros extremos progresivamente disminuye, para dar paso a la presencia única de agua derivada del sistema regional, tal y como se demostró previamente. De este modo, se deduce que la temperatura mínima de equilibrio a profundidad para el agua termal del sistema de flujo regional que se capta en el pozo San Ignacio, es del orden de 87–89°C.

Prueba de aforo y registros de temperatura

La porción final de la figura 10 muestra que en cada una de las 4 primeras etapas de extracción (24.2, 31.1, 34.0 y 44.2 L/s) del aforo existe una tendencia, contraria a lo esperado. En efecto, existe una disminución del nivel dinámico que coincide con la zona donde la temperatura del agua extraída aumenta con relación al tiempo de extracción. Así, de los 1 800 minutos en adelante, ésta se mantiene relativamente estable y se refleja en los abatimientos registrados: no manifiestan una reducción en cada cambio de caudal de extracción.

Se considera que este efecto es evidencia del progresivo aporte de agua de otro flujo que ocasionó una “aparente recuperación” del nivel obtenido en la parte inicial de la prueba. Una vez establecida la entrada de agua termal, cesa dicho efecto. Dado el número de pozos que se encuentran en servicio en el área (muchos de los cuales originalmente extraían agua fría o de mezcla caliente y fría) y el caudal de extracción en su conjunto superior a los 13.7 m³/s, ha resultado en un avance hacia niveles superiores del agua de flujo regional desplazando al agua de menor temperatura. El registro vertical de temperatura de la figura 11, realizado en un pozo de observación localizado a unos 30 m del pozo San Ignacio, se considera como una evidencia adicional. Antes del aforo, a partir de los 90 m de profundidad, se tiene un aumento de la temperatura del agua de 22.0 a 28.7°C. Durante el aforo la temperatura se establece en los 27°C, aproximadamente, incluso en la parte donde el agua tenía una temperatura menor. Esto es, el efecto de la extracción del agua inducida no está restringido sólo al pozo de bombeo.

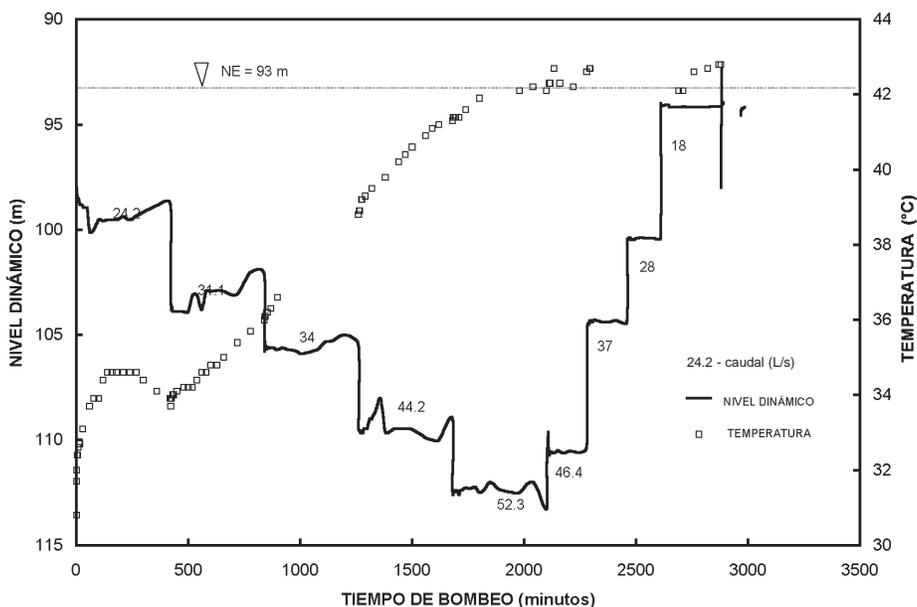


FIGURA 10. Evolución del nivel dinámico con relación al caudal y temperatura.

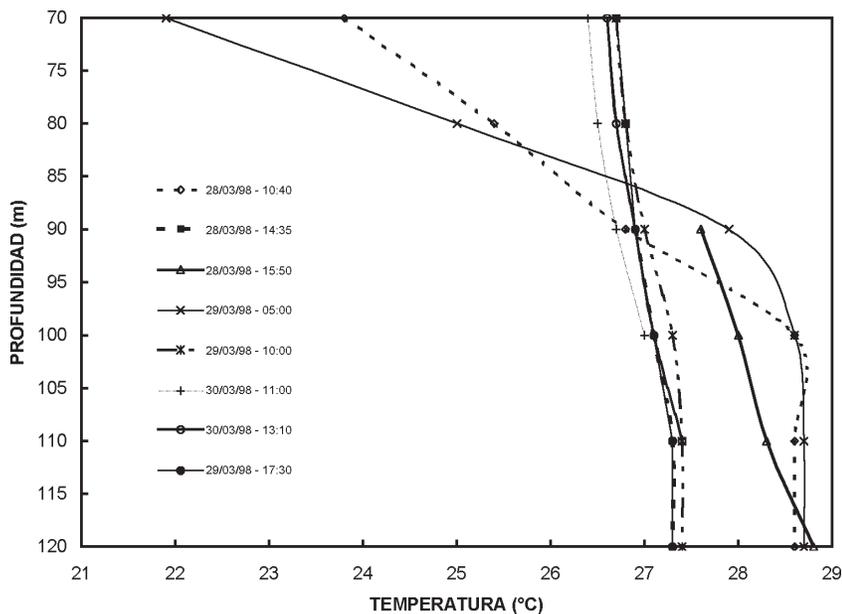


FIGURA 11. Distribución vertical de la temperatura en el pozo de observación.

CONCLUSIONES

Existe una importante variación de la composición química del agua subterránea extraída en el pozo San Ignacio, que es función del tiempo y caudal de extracción. Se estima que esto es ocasionado por la existencia de una estratificación vertical de la calidad del agua y de su temperatura, ya que al parecer este pozo capta, al menos, dos sistemas de flujo subterráneo que circulan a diferente profundidad por medios geológicos contrastantes. Evidentemente, se considera que hay otros factores que condicionan la evolución temporal de la calidad del agua, bajo las condiciones hidrogeológicas locales, que incluyen la construcción y diseño del pozo. Esto es, si el pozo San Ignacio tuviera un diseño distinto, la evolución temporal de la calidad del agua se estima sería diferente a la registrada.

La extracción de agua ocasiona una mezcla mecánica entre los miembros extremos detectados, mezcla que a su vez reacciona con los minerales por donde circula el agua. Se estima que estos procesos y reacciones son los que controlan la evolución observada en las especies químicas disueltas. La información asequible no permite explicar totalmente la evolución del ion fluoruro disuelto en el agua subterránea, por lo que es necesario investigar la influencia que la solubilidad del mineral fluorapatito pudiera ejercer en el sistema.

La temperatura mínima de equilibrio a profundidad para el agua del sistema de flujo regional, es de 87–89°C, temperatura que justifica la necesidad de hacer correcciones por este efecto a los niveles observados en pruebas de bombeo. A este aspecto se debe adicionar que la evolución química definida durante la prueba sugiere que los mecanismos de flujo que se producen durante la extracción son complicados y difieren del tradicional enfoque de flujo radial y horizontal que generalmente se presume existen para interpretar los resultados de las pruebas de bombeo.

Los resultados de la investigación realizada son alentadores en el sentido que se comprobó la existencia de una evolución temporal del agua subterránea en un pozo de extracción. Sin embargo, aun no se cuenta con información suficiente para explicar todos los fenómenos químicos (e hidráulicos) involucrados.

Se definió que existe una capa de agua termal subyacente otra de agua fría, que cuando se extrae la segunda en pozos y en forma no controlada, puede originar el avance de la primera a zonas someras de extracción. El movimiento del agua termal es de abajo hacia arriba, y en este caso de agua con calidad no deseada, por ejemplo con alto contenido de fluoruro y sodio que son potencialmente peligrosos en general para la salud del hombre y en particular para la agricultura. A escala mundial, no existe una metodología para determinar un caudal y/o régimen de operación óptimos y que considere paralelamente los aspectos de calidad a los de cantidad. Se considera que con el conocimiento obtenido del presente trabajo, se tienen bases para lograr concretar dicha definición. El caudal

viable considerará los conceptos que este trabajo confirma sobre el avance del agua termal subyacente hacia niveles superiores, respuesta que se hace cada vez más evidente debido a las solicitudes de agua fría a que ha sido sujeta la parte superior del acuífero.

REFERENCIAS

- Aranda-Gómez, J.J., J.M. Aranda-Gómez y A.F. Nieto-Samanirgo, 1989, "Consideraciones acerca de la evolución tectónica durante el Cenozoico de la sierra de Guanajuato y la parte meridional de la Mesa Central", UNAM, Instituto de Geología, *Revista*, 8, pp. 33-46.
- Arnósson S., 1975, "Application of the silica geothermometer in low temperature hydrothermal areas in Iceland", *American Journal of Science*, 275, pp. 763-784.
- Cardona A., 1997, *Caracterización de sistemas de flujo en el estado de Aguascalientes*. Trabajo de investigación, Posgrado, Ciencias de la Tierra-UNAM, 20 p.
- Cardona A. y Carrillo Rivera J.J., 1995, "Control equilibrio-solubilidad en la concentración de fluoruro en el agua subterránea del centro de México", *Actas INAGEQ*, 1, pp. 51-56.
- Fouilliac, G. y Michard G., 1977, "Sodium/lithium ratio in water applied to geothermal reservoirs", *Geothermics*, vol. 10, pp. 41-50.
- Fournier, R.O., 1981, "Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering", en Ryback, L. y L.J.P. Muffler (eds.), *Geothermal Systems. Principles and Case Histories*, John Willey, N.Y., pp. 109-143.
- Fournier R.O. y Truesdell S.H., 1973, "An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters", *Geochim Cosmochim Acta* 37, pp. 1255-1275.
- Fournier, R.O., 1990, "The interpretation of Na-K-Mg relations in geothermal waters", *Geothermal Res. Council Transactions*, vol. 14, parte II, pp. 1421-1425.
- Freeze, R.A., y Cherry, J., 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- Giggenbach, W.F., 1988, "Geothermal solute equilibria. derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, pp. 2749-2765.
- Henley, R.W., Truesdell, A.H. y Barton J.R., P.B., 1984, "Fluid-mineral equilibria in hydrothermal systems", *Reviews in Economic Geology*, James M. Robertson (ed.), vol. 1, Soc. Ec. Geol., pp. 1-43.
- Hernández-Laloth, N., 1991, *Modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero del valle de León*, Guanajuato. UNAM, Facultad de Ingeniería, tesis profesional, 129 p.
- IGF, Instituto de Geofísica, 1994, *Definición del flujo regional de agua subterránea, su potencialidad y uso en la zona de la ciudad de Aguascalientes*, Fase I, Estudio Local. Informe de Avance, 63 p.

- IGF, Instituto de Geofísica, 1995, *Definición del flujo regional de agua subterránea, su potencialidad y uso en la zona de la ciudad de Aguascalientes*, Fase II, Estudio Regional. Informe de Avance, 84 p.
- Jiménez-Nava, F.J., 1993, "Aportes a la estratigrafía de Aguascalientes mediante la exploración geohidrológica a profundidad", Universidad de Guanajuato, Facultad de Minas, Metalurgia y Geología, Simposio sobre la geología del centro de México, Extensión Minera 93, Resúmenes y guía de excursión.
- Mariner, R.H., Presser, T.S. y Evans, W.C., 1993, "Geothermometry and water-rock interaction in selected thermal systems in the Cascade Range and Modoc Plateau, Western United States", *Geothermics*, 22, pp. 1-15.
- Molina, M.A., 1996, *Diferenciación hidrogeoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en la zona sur-centro del estado de Aguascalientes, México*, Tesis de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, UNAM, p. 121.
- Nieto-Samaniego, A.F.; M.C. Macías-Romo y S.A. Alaniz-Álvarez, 1996, "Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de parte meridional de la Mesa Central, México", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13, pp. 117-122.
- Nieto-Samaniego, A.F.; S.A. Alaniz-Álvarez y G. Labarthe-Hernández, 1997, "La deformación cenozoica poslaramídica en la parte meridional de la mesa central, México", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14 (1), pp. 13-25.
- Paces, T., 1975, "A systematic deviation from Na/K/Ca geothermometer below 75°C and above 10^{-4} atm P_{CO_2} ", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 39, pp. 541-544.
- Parkhurst, D.L., 1995, *User's guide to PHREEQC-A computer program for speciation, reaction-path, advective-transport, and inverse geochemical calculations*, USGS Water RI Report 95-4227, 143 p.
- Tristán-González, M., 1986, *Estratigrafía y tectónica del graben de Villa de Reyes en los estados de San Luis Potosí y Guanajuato*, UASLP, Instituto de Geología, Folleto Técnico, 107, 91p.

HIDROGEOLOGÍA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

*Luis Ernesto Marín Stillman, Julia Guadalupe Pacheco Ávila
y Renán Méndez Ramos*

La Península de Yucatán, en términos de lo que se conoce de su geología, puede ser dividida en tres partes. El este de la península, la zona central, y la zona noroeste. La zona central es el área menos conocida, seguida por la zona este de la península. El noroeste de la península es el área mejor conocida y ha sido muy estudiada tanto por investigadores mexicanos como por investigadores extranjeros. En esta parte de Yucatán es donde se encuentra sepultado el Cráter de Chicxulub, por lo cual, la geología de esta zona ha recibido muchísima atención a partir de la década de los noventas. En este capítulo se hablará primero de los rasgos generales de la Península de Yucatán, en su zona central, posteriormente, se tocará el este de la península y finalmente el noroeste (el área más estudiada).

FISIOGRAFÍA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

La Península de Yucatán, corresponde a la provincia fisiográfica denominada planicie costera del Golfo de México. Sin embargo, debido a sus características, se le denomina “Plataforma Calcárea de Yucatán”, la cual se caracteriza por ser una superficie sensiblemente plana, principalmente en la parte norte de la misma y en la parte sur oriental se encuentran lomeríos prolongados de gran altura. Su principal rasgo fisiográfico es la “Sierrita de Ticul”, que tiene una orientación NO-SE, extensión de 110 km, y una elevación máxima de 275 m.s.n.m. Este rasgo, separa la topografía de la región en dos regiones; hacia el sur se aprecia una serie de lomeríos con pequeños valles hasta de 150 m.s.n.m., y hacia el norte, se observa una extensa planicie con pendiente desde los 50 m hasta el nivel del mar.

La península ha tenido una evolución geológica compleja y ha jugado un papel importante en el origen del Golfo de México y en el desarrollo de la geo-

logía del Caribe. Se caracteriza por un basamento metamórfico de edad paleozoica sobre el cual ha evolucionado una secuencia sedimentaria de más de 3000 metros de espesor depositada desde el Jurásico hasta el Reciente.

El ciclo sedimentario mesozoico comienza con un depósito de rocas Jurásicas de origen continental con intercalaciones volcánicas; al parecer la fuente de suministro de los materiales provenía de un basamento paleozoico. Durante el Cretácico se formaron cuencas de circulación restringida generando las condiciones propicias para el desarrollo de sedimentación evaporítica.

En el Cretácico Superior en la Península de Yucatán se manifestaron cambios en la sedimentación; por un lado, la porción central comenzó a emerger hasta quedar bien expuesta. Los materiales asociados con este evento son las margas y horizontes de bentonita en áreas alejadas de las antiguas costas, y dolomías, areniscas y derrames andesíticos en las zonas poco profundas. Durante el Terciario y Cuaternario se presentan facies de plataforma somera en ambientes de supramarea; generados por la continua oscilación del nivel del mar.

Las rocas carbonatadas, al ser disueltas, no dejan residuo alguno. Por lo tanto, la Península de Yucatán tiene espesores de suelo muy reducidos. Como consecuencia de esta ausencia de suelos, se ha generado un sistema acuífero cárstico maduro. La única fuente de agua potable para la península es un lente delgado de agua dulce que flota sobre agua salada (Marín, 1990). Este frágil y vulnerable acuífero también es el receptor final de todas las descargas tanto urbanas como industriales en la península.

Las expresiones cársticas principales corresponden a los cenotes y dolinas que son manifestaciones cársticas, típicas de ésta parte del país. Varían en diámetro desde unos cuantos metros hasta más de 100 m, fueron formados principalmente por la acción vertical de la disolución y el paso del agua hacia zonas profundas del nivel estático durante los periodos glaciales y revelan que las calizas han estado sujetas a una disolución vertical significativa (Freeze y Cherry, 1979; Acosta Rodríguez y Méndez Ramos, 2001). La posición actual del nivel medio del mar se considera una posición interglacial donde el drenaje vertical hasta el nivel freático es de solo unos cuantos metros. Muchas de estas estructuras se encuentran a lo largo de los sistemas de fracturas y fallas.

Las caletas, formas costeras semicirculares se presentan principalmente en la porción nor oriental asociadas con manantiales y resurgencias, así como con playas creadas por la disolución de las rocas carbonatadas, estas se producen por la acción del agua descargada por el acuífero. Las cavernas o grutas, son la manifestación más espectacular de formas cársticas, se encuentran de diverso tamaño y extensión en función de la edad de la roca e incidencia de los rasgos geológicos estructurales. Algunos son salones “fósiles” de disolución y otras se encuentran inundados por agua subterránea. En la superficie se observan manifestaciones como cúpulas, domos y microdomos entre otras.

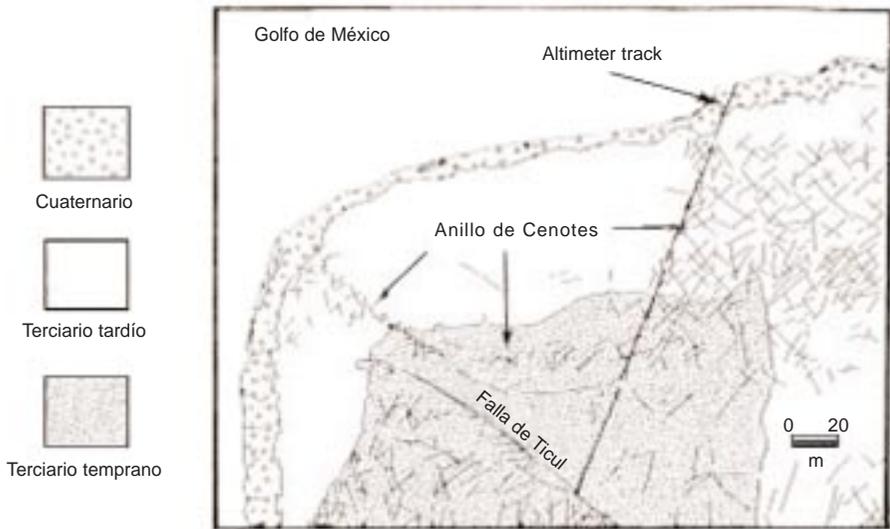


FIGURA 1. Geología de la Península de Yucatán.

Fuente: Marín *et al.*, 1991.

Los principales ejes estructurales de la Península de Yucatán presentan una orientación ONO-ESE y NNE-SSO, y están asociados con la Sierrita de Ticul y el Sistema Bacalar-Río Hondo, respectivamente (Butterlin y Bonet, 1963). El eje determinado por la Sierrita de Ticul corresponde a una falla de tipo normal, en tanto que el segundo eje corresponde a una serie de fallas normales escalonadas, formando horts y graben que varían en longitud y desplazamiento. Otros rasgos estructurales de suma importancia son las fracturas que se encuentran en la parte noreste de la península conocida como la “Zona de Fracturas de Holbox”, que bien pudieran estar asociadas con el Sistema Bacalar-Río Hondo. Las fracturas de Holbox son lineamientos que Weidie (1982) observó y tienen cientos de kilómetros de extensión. Estos lineamientos van desde Cabo Catoche hasta Chetumal. A la fecha, la influencia que este sistema de fracturas ejerce sobre la hidrogeología regional no ha sido estudiada. La Sierrita de Ticul separa a la planicie costera de Yucatán (figura 2). El nivel freático en la zona costera se encuentra a profundidades máximas de 30 metros de la superficie, mientras que al pasar la Sierrita, el nivel freático se encuentra a más de 80 metros de la superficie. El Anillo de Cenotes es una estructura que ejerce una profunda influencia sobre la hidrogeología regional y está relacionado con la estructura de impacto de Chicxulub (discutido más adelante).



FIGURA 2. Geología estructural de la Península de Yucatán.

Fuente: López Ramos, 1980.

HIDROGEOLOGÍA DE LA ZONA CENTRAL DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

La hidrogeología de la zona central de la Península de Yucatán ha sido poco estudiada. Apenas existen un par de trabajos que mencionan algunos aspectos cualitativos de esta área. Estos estudios son las Sinopsis Geohidrológicas de los Estados de Quintana Roo y Yucatán (1990 y 1988) publicados por la Comisión Nacional del Agua. Desde un punto de vista hidrogeológico esta zona es muy importante, ya que en esta zona se encuentra el parte-aguas regional que divide la península en dos partes, la parte del noroeste y del noreste.

Esta área provincial es la más compleja de estas provincias de la península debido a su mayor elevación y relieve topográfico, aunque se distingue por sus formas cársticas de grandes dimensiones, su mayor disponibilidad de suelos; vegetación más alta; densa capa de yeso y por la falla que la separa de la Planicie interior.

La falla de Ticul es el límite norte de esta provincia. Se ubica desde Maxcanú hasta Oxkutzcab y se extiende hacia toda la porción ssw de la península; está asociada a un levantamiento diferencial y a procesos de diapirosmo. La zona está constituida básicamente por las calizas del miembro Pisté del Eoceno medio, en afloramiento de la Sierrita de Ticul, y por las calizas y yesos del Paleoceno-Eoceno no diferenciado.

Las elevaciones topográficas en esta provincia son mayores a 50 metros, alcanzando los 300 metros en algunos puntos. Los niveles estáticos son profundos, 200 metros en ciertos sitios, lo cual contrasta con el resto de la península, en donde por lo general las máximas elevaciones son menores a 40 metros con profundidades del agua de 30 metros.

Esta prominente elevación ha generado un relieve mucho más marcado y un desarrollo del carst más maduro. Se encuentran sistemas de cavernas fósiles y una mayor acumulación de suelos y grandes cuerpos de agua superficial en depresiones cerradas como los lagos de Silvituc en Campeche. Las expresiones de un carst maduro son también los “bajos” o Poljes de pequeño a regular tamaño como el que se desarrolla a lo largo del arroyo Ucum en Quintana Roo. En algunos lugares los Poljes son tan pequeños y están tan juntos uno del otro, que forman una topografía cárstica de macrodomos como la que se observa en la parte posterior de la Sierrita de Ticul en las cercanías de Santa Elena, en Yucatán.

HIDROGEOLOGÍA DEL NORESTE DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

La hidrogeología de esta área fue estudiada de manera cualitativa por William Back y colaboradores en los setenta. Este grupo de investigadores norteamericanos se dedicó en la década de los setenta a estudiar en particular la interacción agua-roca de las rocas carbonatadas de esta área.

Beddows (2003) describe el acuífero costero de Quintana Roo como un acuífero de porosidad triple y comenta que donde es necesario considerar el flujo del agua subterránea es a través de la matriz, fracturas, y sistema de cavernas interconectadas. La orientación de las cavernas de esta zona es NNW-SSE, casi perpendicular a la costa. La formación de éstas fue multi-facética cuando el nivel del mar se encontraba más abajo que el actual.

Las cavernas tienen generalmente más de cinco metros de ancho, llegando a alcanzar hasta más de 50 metros de ancho. Este tipo de disolución se conoce como “bedding plane passages”. Estos sistemas pueden tener de dos a cinco metros de alto (aunque hay casos raros cuyas alturas son superiores a los diez metros), a menos de que estén asociadas con estructuras de colapso. Los conductos explorados se encuentran de la costa hasta 12 km de la costa. La profundidad máxima promedio de los sistemas es de 16 metros debajo del espejo de agua. Los mecanismos de formación de estos conductos son corrosión del agua dulce con el agua salada y reacciones mediadas por bacterias.

Algunos ejemplos de sistemas verticales extensos son el Sistema Abejas, donde una gruta llamada Aak Kimin (la cual descarga a la caleta de Yal-Ku), tiene de dos a cinco metros de ancho, y una profundidad de 69 metros.

En el último kilómetro paralelo a la costa, los conductos tienden a ser paralelos a ésta, influenciados por el sistema de fracturas de la zona. El flujo está dirigido hacia la parte alta de las caletas que tienen una característica forma de “Y”, donde a través de fracturas con orientación N-S descargan a canales principales que conducen el agua dulce al mar, como se puede ver en las caletas de Yal-Ku y Xel-Ha. Los cenotes con extensiones verticales considerables como “The Pit” (119 m de profundidad en el Sistema Dos Ojos) y “Blue Abyss” (74 m de profundidad en el Sistema Nohoch Nah Chich) indica que el desarrollo de sistemas extensos de cavernas ocurrió durante periodos que el nivel del mar se encontraba más abajo.

La exploración de las cavernas comenzó a principio de los ochenta. El Quintana Roo Speleological Survey (Servicio de Espeleomapeo de Quintana Roo) mantiene estadísticas sobre los 86 sistemas de cavernas reportados. Actualmente se tienen más de 412 km de cavernas subacuáticas mapeadas (la información puede verse en www.caves.org/project/qrss/qrss.thm). La caverna subacuática más grande del mundo, Ox Bel Ha tiene más de 121 km de conductos y la exploración de la misma continúa hoy en día (información de Ox Bel Ha se encuentra en www.mexicocavediving.com).

Beddows (*op. cit.*) reporta el espesor del lente de agua dulce en el Caribe. A 50 km de la costa, el lente tiene 50 metros; a 11.7 km de la costa, en el cenote Angelita el espesor del lente es de 30 metros y se reduce a entre 10-15 metros a cuatro y medio kilómetro de la costa. En uno de los puntos de descarga del Sistema de Ox Bel Ha, existe un manantial con un espesor de agua dulce de 11 metros.

HIDROGEOLOGÍA DEL NOROESTE DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

El Cráter de Chicxulub ejerce una influencia importante sobre la hidrogeología regional del noroeste de Yucatán, por lo tanto, se presenta primero un resumen de esta estructura, seguida por la hidrogeología regional.

En la carta geológica publicada en 1974 por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía, e Informática (INEGI, 1974) aparecen varias zonas denominadas “Zona de Cenotes”. A pesar de que el personal del INEGI ya había notado la presencia de estos rasgos geomorfológicos, no fue sino hasta 1990 que Charles Duller, de la National Space Administration (NASA), reconoció la continuidad de estos, en lo que hoy es conocido como el Anillo de Cenotes. La figura 3 muestra la localización del Anillo de Cenotes. En 1990, no se sabía sobre la relación entre el Cráter de Chicxulub y el Anillo de Cenotes, por lo anterior, se hará un breve paréntesis para hablar del Cráter de Chicxulub, y posteriormente se regresará a la importancia hidrogeológica del Anillo de Cenotes.

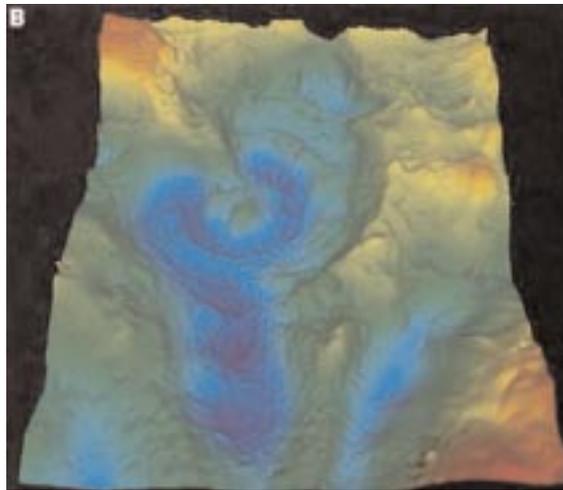


FIGURA 4. Gravimetría del Cráter de Chicxulub.

Fuente: Sharpton *et al.*, 1993.

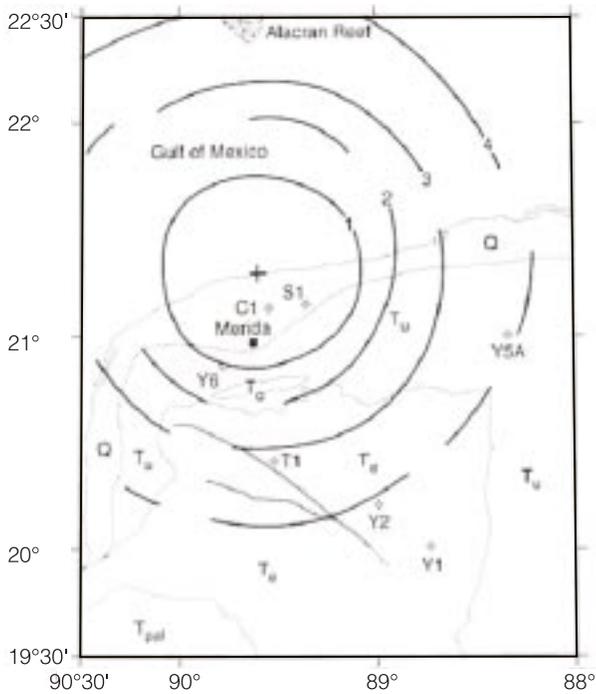


FIGURA 5. El Anillo de Cenotes se encuentra sobre el tercer anillo de acuerdo al modelo de Sharpton *et al.* (1993).

Existe información disponible de subsuelo obtenida de los pozos perforados por Pemex y de un grupo de perforaciones de investigación realizadas por la UNAM. Los pozos realizados por la UNAM (1 al UNAM-8) alcanzaron profundidades de 70 hasta 702 metros. Basados en estos pozos, se sabe que los primeros cientos de metros desde la superficie consisten de rocas calizas del Terciario. Esto ha dado como resultado que se haya desarrollado un sistema cárstico maduro. La disolución de la roca caliza no permite la formación de suelo, por lo que en la planicie costera, prácticamente no hay suelo.

La única fuente de agua potable en la Península de Yucatán es un acuífero regional. Este acuífero es un lente delgado de agua dulce que flota sobre agua salada. El espesor del lente en Mérida, Yucatán (en el observatorio meteorológico) es de 61 metros. De acuerdo a Steinich y Marín (1996), el espesor varía de 16 metros en la costa (Chuburna) a más de 80 metros en Sotuta (al sur del pozo Y5A). El acuífero es libre excepto por una banda paralela a la costa (Perry *et al.*, 1989; 1990). Por la naturaleza libre del acuífero, la zona de recarga es a lo largo de todo el acuífero. Esto hace que el acuífero sea sumamente vulnerable a la contaminación (Marín y Perry, 1994; Marín *et al.*, 2000). Más detalles sobre la hidrogeología física y química de este acuífero se pueden encontrar en: Marín (en prensa) y Perry *et al.* (en prensa).

Algunos de los problemas más importantes enfrentados por los habitantes de la Península de Yucatán, en lo que respecta al abastecimiento de agua, son:

1. Falta de un sistema de colección y tratamiento de aguas negras, industriales
2. Disposición final de las aguas negras
3. Fuentes de recarga urbana
4. Falta de un sistema de tratamiento de residuos sólidos (rellenos sanitarios)
5. Gradiente inducido hacia la batería de pozos Mérida I
6. Uso indiscriminado de fertilizantes, pesticidas
7. Crecimiento sin regulación de granjas porcícolas y avícolas
8. Salinización del acuífero por sobre-explotación
9. Destrucción de la capa confinante (noroeste de Yucatán)
10. Crecimiento explosivo en las costas sin la infraestructura urbana necesaria (agua potable entubada, sistema de recolección de aguas negras y tratamiento).

1. Falta de un sistema de colección y tratamiento de aguas negras, industriales

La mayoría de las casas en Mérida cuentan con fosas sépticas (que no son más que hoyos terminados de tres a cinco metros por debajo del nivel del terreno). La zona no-saturada en Mérida varía de ocho a 12 metros, por lo tanto, las fosas sépticas se encuentran de tres a siete metros del nivel freático. El espesor promedio del lente de agua dulce en Mérida tiene apenas 60 metros. De acuerdo a Méndez (2001), los primeros 20 metros del lente de agua dulce que subyacen a la Ciudad

de Mérida, no cumplen con las normas para ser utilizados como agua potable. Por lo tanto, hoy en día, la tercera parte del volumen total disponible no puede ser usado para agua potable. Marín *et al.* (2001) reportan que en el censo nacional de 1990 se registraron más de 83 000 fosas sépticas en servicio en el área metropolitana de Mérida. Se ha establecido que entre 70 y 75% de la población meridana actualmente, propicia descargas domésticas mediante fosas sépticas (González Herrera, 1992), 5% vierte sus aguas residuales tratadas dentro de la interfase salina y 20% restante utiliza letrinas. La fosa séptica común está diseñada para retener sólidos; sin embargo, su tiempo de retención dura sólo unas cuantas horas.

2. Disposición final de las aguas negras

Todos los desechos de la ciudad de Mérida como los provenientes de los relleños sanitarios, basureros, etc., llegan directamente al acuífero. En la mayoría de los casos, esto ocurre sin que los desechos reciban tratamiento alguno. Se han planteado varias alternativas para disponer de las aguas negras crudas o tratadas. Una de las formas comunes de manejo de aguas residuales por parte de los hoteles en la Ciudad de Mérida es la de tratar el agua e inyectarla por debajo del lente de agua dulce. Esta propuesta se ha manejado como opción para las aguas negras de la Ciudad de Mérida. Es preocupante que se inyecten las aguas negras crudas por debajo de la interfase del agua dulce/salada ya que estas aguas pueden migrar hacia arriba. Potencialmente esto puede degradar la calidad del agua del acuífero en su parte inferior al mezclar agua salada (contaminada con materia orgánica) con el agua dulce. Otras opciones que están siendo contempladas son concentrar las aguas crudas, llevarlas mediante un acueducto, descargarlas al mar. Mérida se encuentra a más de 30 kilómetros de la costa, lo que resultaría en un alto costo de construcción de la infraestructura para concentrar las aguas negras y transportarlas al mar. Asimismo, esto podría causar problemas ambientales en el mar. Quizás la mejor opción es tratar el agua y usarla para la agricultura. Sin embargo, en Mérida y otras ciudades de la Península de Yucatán existe el problema de cómo recolectar esta agua, ya que la roca caliza aflora en la superficie, y tratar de construir cualquier sistema de recolección de aguas negras municipales sería sumamente costoso.

3. Fuentes de recarga urbana

Frecuentemente se cree que la urbanización y el consiguiente recubrimiento de los suelos permeables por los edificios y áreas pavimentadas, necesariamente reduce la recarga a los acuíferos subterráneos adyacentes. Sin embargo, esto rara vez sucede (Foster *et al.*, 1993). Por el contrario, es bastante común y se da como resultado de los cambios de largo alcance en el balance hidrológico urbano. A continuación se presentan varios tipos de recarga urbana, los cuales son comunes en Mérida, Yucatán.

Fugas en Redes de Distribución.— La mayor fuente de recarga subterránea en los principales asentamientos humanos, se debe a las pérdidas de agua de excelente calidad química en las redes de distribución de agua. Estas pérdidas a menudo exceden hasta 20% del total de agua en circulación (Lerner, 1986). Las redes meridanas suministran cerca de $88.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$, de donde resulta que las fugas equivalen a unos $17.7 \text{ Mm}^3/\text{año}$, los cuales significan una recarga importante del acuífero y por tanto el volumen servido es de $70.8 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

Entradas de agua doméstico-sanitarias.— Se presume que el uso de agua municipal, incluso en aquellas áreas no abastecidas por cañerías, es de $460/\text{L}/\text{d}/\text{hab}$, por lo consiguiente el volumen total de agua utilizada cada año es de casi $90 \text{ Mm}^3/\text{año}$. De este total, de 5 a 10% se pierde por evaporación ($9 \text{ Mm}^3/\text{año}$); pero como la recarga del acuífero mediante fugas de agua potable es de $17.7 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y el de las descargas de $64.8 \text{ Mm}^3/\text{año}$, el volumen total de recarga del acuífero en la ciudad de Mérida es de $82.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

Irrigación de áreas verdes.— La irrigación de áreas de esparcimiento como plazas y jardines, es común y generalmente se lleva al cabo mediante pozos construidos en el mismo sitio para tal propósito. Empero, no ha sido posible separar las pérdidas por aguas residuales domésticas de las originadas por irrigación de jardines.

Recarga en áreas no pavimentadas.— Aunque una importante porción del área ha sido impermeabilizada por pavimento, caminos y techos, gran parte del agua de lluvia es encauzada de esas áreas a pozos o canales de absorción ubicadas a sus orillas. Es probable que esta recarga por lluvia sea de la misma magnitud, debido a reducidas pérdidas por evaporación. Es factible que la calidad química de esta recarga sea buena, aunque el agua de desalojo de caminos y patios puede ser de una calidad más pobre.

4. Falta de un sistema de tratamiento de residuos sólidos (rellenos sanitarios)

El acuífero de la Península de Yucatán es sumamente vulnerable a la contaminación, por lo tanto, la ubicación de los rellenos sanitarios debe de hacerse después de realizar un estudio muy detallado. Existe un tiradero en las afueras de Umán (al sur de Mérida). Si bien este tiradero ya no se usa actualmente, se encuentra sobre un parte-aguas, a menos de diez kilómetros del campo de pozos Mérida II. No se tiene información en cuanto a los niveles piezométricos en esta zona, por lo cual no se puede decir en este momento si hay flujo del agua subterránea del tiradero de Umán hacia la batería de pozos Mérida II. Esto sin embargo, es un punto crítico y debería de ser investigado inmediatamente. Asimismo, hay prácticas entre los habitantes que de la Península de Yucatán que tendrán que ser modificadas. Por ejemplo, los cenotes se usan indistintamente como fuentes de

abastecimiento de agua potable, como centros recreativos, o como tiraderos municipales (Ej. el tiradero municipal de Ucú).

5. Gradiente inducido hacia la batería de pozos Mérida I

El campo de pozos Mérida I es el principal campo de pozos de abastecimiento de agua potable para la Ciudad de Mérida. El gradiente hidráulico regional, de acuerdo a Marín *et al.* (1987) y Marín (1990) es del orden de 7-10 mm/km (con dirección de sur a norte). El gradiente inducido por las extracciones del campo de pozos Mérida I con dirección norte a sur es de 41 mm/km. Es decir, el gradiente inducido es de cuatro a diez veces mayor (Marín *et al.*, 2001). Esto es preocupante, porque potencialmente se están jalando aguas contaminadas del sur de la Ciudad de Mérida para ser introducidas a la red de agua potable.

6. Uso indiscriminado de fertilizantes, pesticidas

El otro problema que se tiene es el uso indiscriminado de pesticidas. Algunos de ellos tienen compuestos orgánicos cuya exposición a largo tiempo pueden generar enfermedades como el cáncer. Cabrera y Pacheco (1996) realizaron un estudio en el sur del estado donde encontraron la presencia de compuestos orgánicos como 2, 4 D y 2, 4, 5-T en el agua subterránea.

7. Crecimiento sin regulación de granjas porcícolas y avícolas

En los últimos años y con la finalidad de impulsar el desarrollo socio-económico del estado, se ha estado desarrollando la agricultura de cítricos (naranja principalmente) y la creación de granjas porcinas y avícolas. Hay dos problemas que se han desarrollado a la par con este crecimiento que han impactado de manera negativa al acuífero. El primero es el uso indiscriminado de fertilizantes. La idea de los agricultores (por falta de asesoría técnica) va en el sentido de que si ellos aplican una cantidad determinada de fertilizante, ayudarán a que sus cosechas sean mejores. Sin embargo, ellos piensan que si le ponen más fertilizante del necesario, sus cosechas mejorarán sin darse cuenta de que los nutrientes que las plantas no necesitan, se van directo al acuífero. Esto tiene dos consecuencias: encarece el producto (porque están aplicando fertilizante que en esencia se está desperdiciando), y lo que quizá es peor, están contaminando el acuífero. Pacheco *et al.* (2001) demostraron que para la zona sur del estado de Yucatán, las concentraciones de fondo en época de estiaje (en pozos de abastecimiento de agua potable) es mayor a los 200 mg/L (la norma para agua potable es de máximo 45 mg/L). Durante el periodo de lluvias, la concentración de nitratos baja a aproximadamente 60 mg/L, valor todavía por encima de la norma.

8. Salinización del acuífero por sobre-explotación

El crecimiento de las granjas porcícolas y avícolas en el estado de Yucatán ha ayu-

dado al desarrollo económico del estado. Las grandes granjas, debido a su capacidad económica pueden (y generalmente si cumplen con esta norma) construir plantas de tratamiento de agua para sus desechos. Este no es el caso para las pequeñas granjas, principalmente por falta de recursos económicos. El problema es que uno puede encontrar estas pequeñas granjas porque se distribuyen en gran parte del estado.

Escolero *et al.* (en prensa) han postulado que en las áreas en las que existen baterías de pozos para abastecer de agua potable a la población se esta salinizando el acuífero. González Hita *et al.* (2003) también han documentado esto para áreas cercanas a la costa. El acuífero de la Península de Yucatán tiene que ser manejado como el acuífero de una isla, en la que se cuente con un sistema de monitoreo de la interfase salina, y en el cual se cuente con un diseño de pozo y ubicación de los mismos para minimizar la salinización del acuífero.

9. Destrucción de la capa confinante en el noroeste de Yucatán

Perry *et al.* (1989, 1990), han descrito la presencia de una capa de carbonato de calcio paralela a la costa en el noroeste de Yucatán que confina al acuífero. Esta capa se produce cuando el agua supersaturada con carbonato de calcio llega a la zona de descarga, la cual se encuentra a lo largo de la costa. Al llegar esta agua, el CO_2 se escapa hacia la atmósfera, y se precipita el carbonato de calcio formando una capa de carbonato de calcio similar al caliche. La capa tiene una extensión de aproximadamente 22 kilómetros en Celestún y más de cinco kilómetros en Dzilam de Bravo. Esta capa se encuentra a menos de un metro de la superficie del terreno. La capa tiene de 0.4 a 1.5 metros de espesor. Dicha capa esta siendo destruida con el desarrollo que esta sufriendo la costa del norte de Yucatán. Marín (1990), Marín *et al.* (2001), simularon el efecto que tendría el destruir la capa en forma sistemática. Utilizando la relación de Ghyben-Herzberg en la costa (que es el área en la cual es menos exacta), Marín (1990), Steinich y Marín (1996) y Marín *et al.* (en prensa) calcularon que el espesor del lente de agua dulce en la costa (en el área de Chuburna) con la capa confinante era de aproximadamente 16 metros de espesor. Al romper la capa confinante, el espesor del lente se reducía a 12 metros. Considerando que la zona costera, desde hace varios años, ya tiene problemas de abastecimiento de agua, el romper en forma sistemática esta capa confinante, esto sólo agravará los problemas de abastecimiento de agua en la costa del norte de Yucatán.

10. Crecimiento urbano acelerado en las costas sin la infraestructura urbana

A lo largo de las costas de toda la Península de Yucatán se esta dando un crecimiento explosivo. Por ejemplo, Playa del Carmen es la ciudad que más rápido esta creciendo en todo Latino América. Si bien, para los desarrollos turísticos nuevos se les pide la instalación de plantas de tratamiento de agua, eso no es el

caso para los desarrollos urbanos que van creciendo atrás de los desarrollos turísticos los cuales no cuentan con sistemas de abastecimiento de agua potable, ni sistemas de recolección de aguas negras. Hay estimaciones de que van de 10 hasta 18 personas de apoyo (esto incluye empleos directos e indirectos) por cada cuarto de hotel en la Ribera Maya. Muchas de las colonias, también conocidas como ciudades perdidas descargan sus aguas negras directamente a los cenotes.

CONCLUSIONES

El acuífero de la Península de Yucatán es muy vulnerable a la contaminación debido a su geología. En particular, la ausencia de suelos ha resultado en un lente delgado de agua dulce que flota sobre agua salada. Los estudios hidrogeológicos que se han desarrollado en el noroeste de la Península de Yucatán han permitido que se hagan propuestas como la de la creación de una zona de reserva hidrogeológica para la Ciudad de Mérida (Escolero *et al.*, 2000). Sin embargo, es muy importante que se proponga un plan maestro para el desarrollo sustentable de toda la Península de Yucatán. En particular, es preocupante el escaso conocimiento acerca de los volúmenes de agua dulce disponible en la Ribera Maya, una de las zonas con mayor crecimiento. Asimismo, los sistemas de cavernas y cuevas subacuáticas que se encuentran en esta zona permiten el paso rápido de los contaminantes del área continental hacia la costa. Se debería de realizar un esfuerzo por cartografiar estos sistemas e incluirlos en los planes de crecimiento y desarrollo de la península.

Los problemas que se presentaron en este capítulo son similares a las condiciones de los acuíferos costeros que existen a lo largo del litoral de México. Una forma que se propone para empezar a resolver este tipo de problemas son alianzas estratégicas entre la iniciativa privada, los tres niveles de gobierno (federal, estatal y municipal) y las instituciones de educación superior. De esta manera, se pueden tratar a llegar a soluciones que realmente puedan llegar a un desarrollo sustentable.

LITERATURA CITADA

- Acosta Rodríguez, J.L. y R., Méndez Ramos, 2001, *Programa de Saneamiento del Municipio y la Ciudad de Mérida*, Subgerencia Regional Técnica, Gerencia Regional Península de Yucatán, Comisión Nacional del Agua, Mérida, Yucatán.
- Alcocer, J., L.E. Marín y E. Escobar, 1998, "Geochemical evaluation of five cenotes for use as potential drinking water supplies in northeastern Yucatan, Mexico", *Hydrogeology Journal*, 6, pp. 293-301.

- Beddows, P. A., Smart, P. L., Whitaker, F. F. and Smith, S. L. 2002. Density stratified groundwater circulation on the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. Pages 129-134 In: J. B. Martin, C. M. Wicks and I. D. Sasowsky, Editors. *Hydrogeology and Biology of Post-Paleozoic Carbonate Aquifers*, Special Publication 7. Karst Waters Institute.
- Butterlin J., Bonet F. (1960). Formaciones Cenozoicas de la Parte Mexicana de la Península de Yucatán. Instituto de Geología, UNAM.
- Cabrera, A., J.A. Pacheco, 1996, "Herbicidas en el agua subterránea del estado de Yucatán", en C. Alberty, S. Osorio (eds.), *La Toxicología en México. Estado actual y perspectivas*, México.
- CNA, 1988, Comisión Nacional del Agua, Sinópsis geohidrológica del estado de Yucatán, Gerencia de Aguas Subterráneas, México, D.F., México.
- CNA, 1990, Comisión Nacional del Agua, Sinópsis geohidrológica del estado de Quintana Roo, Gerencia de Aguas Subterráneas, México, D.F., México
- Escolero, O.A., L.E. Marín, B. Steinich, A.J. Pacheco, S.A. Cabrera y J. Alcocer, 2002, "Strategy for the protection of karstic aquifers: The Merida Yucatan, Mexico example", *Water Resources Management*, 16 (5), pp. 352-367.
- Escolero, O.A., L.E. Marín, B. Steinich y J. Pacheco, 2000, "Delimitation of a hydrogeological reserve for a city within a karstic aquifer: the Merida, Yucatan, example", *Landscape and Urban Planning*, 51, pp. 53-62.
- Escolero, O., L. E. Marin, J. A. Pacheco, A. Molina-Maldonado, J. M. Anzaldo, Geochemical Characterization of the greater Hydrogeological Reserve Zone for Merida, Yucatan, Mexico, en prensa, Geofísica Internacional Freeze, A., y J.C. Cherry, 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall, Nueva Jersey, USA, 679 p.
- Foster S.S.D., Morris B.L., Lawrence B.R. (1994) Effects of urbanisation on groundwater recharge. Proc. ICE Intl. Conf. "Groundwater Problems in Urban Areas" (London . June 1993): 43-46.
- González H.R. (1992). Evolution of Grounwater Contamination in the Yucatan karstic Aquifer. Tesis de Maestría. University of Waterloo, Canadá.
- Gonzalez Hita, L., M. Martinez Morales, M.A. Mejia Gonzalez, P.Gallardo Almanza, 2003, Definición de reglas de operación del acuífero costero de la Península de Yucatán, Primera Parte, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Juitepec, Morelos.
- Hildebrand, A., G.T. Penfield, D.A. Kring, M. Pilkington, A. Camargo Z., S.B. Jacobsen y W.V. Boynton, 1991, "Chicxulub Crater: a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico", *Geology*, 19, pp. 867-871.
- INEGI, 1974, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Carta Geológica de Yucatán, 1:250 000, Aguascalientes, Aguascalientes.
- Lerner D.N. (1986) Leaking pipes recharge groundwater. *Ground Water* 24: 654-662.
- López Ramos, E., *Geología de México*, vol. III: México, D.F., México.
- Marín, L.E., Physical hydrogeology of the Yucatan Peninsula, en arbitraje, en *Physical and Chemical Hydrogeology of the Yucatán Peninsula*, L.E. Marín,

- E.C. Perry, W.C. Ward (Eds.), en arbitraje, National Ground Water Association, USA.
- Marín, L.E., 1990, Field investigations and numerical simulation of groundwater flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico, tesis doctoral, Northern Illinois University, DeKalb, Illinois, USA.
- Marín, L.E., J.A. Pacheco, R. Méndez, La Hidrogeología de la Península de Yucatán, en “El Futuro del Agua en México”, en prensa, B. Jiménez y L.E. Marín (Eds.), Academia Mexicana de Ciencias.
- Marín, L.E., B. Steinich, J. Pacheco y O.A. Escolero, 2001, “Hydrogeology of a contaminated sole-source karst aquifer: The case of Merida, Yucatan, Mexico”, *Geofísica Internacional*, 39 (4), pp. 359-365.
- Marín, L.E., E.C. Perry, C. Booth y M. Villasuso, 1987, “Hydrogeology of the northwest Peninsula of Yucatan, Mexico, EOS”, *Transactions, American Geophysical Union*, 69, p. 1292.
- Marín, L.E., E.C. Perry, C. Booth y M. Villasuso, 1991, “Hurricane Gilbert: its effects on the aquifer in northwestern Yucatan, Mexico, International Association of Hydrogeologists”, en Simpson, E.S. y J.M. Sharp, Jr. (eds.), *Selected Papers on Hydrogeology from the 28th International Geologic Congress*, Washington, D.C., USA, julio 9-19, vol. 1, pp. 111-127.
- Marín, L.E., E.C. Perry, H.I. Essadid, B. Steinich, 2003, Numerical Simulation of the karstic aquifer of northwest Yucatan, Mexico, Coastal Aquifer Management—Monitoring, Modeling, and Case Studies, CRC Press, Editors: Alexander H.-D. Cheng and Driss Ouazar, 257-278 p.
- Marín, L.E., V.L. Sharpton, J. Urrutía Fucugauchi, M. Rebolledo-Vieyra, “Stratigraphy at Ground Zero: A contemporary Evaluation of Well Data within the Chicxulub Impact Basin, 2001”, *International Geology Review*, 43 (12), pp. 1145-1149.
- Marín, L.E. y E.C. Perry, 1994, “The hydrogeology and contamination potential of northwestern Yucatan, Mexico”, *Geofísica Internacional*, 33, pp. 619-623.
- Méndez, R., 1993, *Generalidades sobre la Propuesta de Reglamentación del Acuífero de Yucatán*, Jefatura de Departamento de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Administración del Agua, Gerencia Estatal Yucatán, Comisión Nacional del Agua, Mérida, Yucatán.
- Méndez, R., 2001, *Propuesta de Saneamiento para el Municipio de Mérida, Yucatán*, Jefatura Proyecto del Consultivo Técnico, Subgerencia Regional Técnica, Gerencia Regional Península de Yucatán, Comisión Nacional del Agua, Mérida, Yucatán.
- Pacheco, A., J.A. Cabrera S. y L.E. Marín, 2000, “Bacteriological contamination assessment in the karstic aquifer of Yucatan, México”, *Geofísica Internacional*, 39 (3), pp. 285-291.
- Pacheco, A., J.A. Cabrera S. y L.E. Marín, 2001, “Nitrate temporal and spatial patterns in twelve water supply wells, Yucatan, Mexico”, *Environmental Geology*, 40 (6), pp. 708-715.

- Penfield, G. y A. Camargo, 1981, "Definition of a major igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetics and gravity, Society of Exploration Geophysicists", en 51 *Annual International meeting*, Los Angeles, CA, USA Abstracts, p. 37.
- Perry, E.C. y G. Velázquez Olimán, Groundwater Geochemistry of the Yucatan, Physical and Chemical Hydrogeology of the Yucatán Peninsula, L.E. Marín, E.C. Perry, W.C. Ward (eds.), en arbitraje, National Ground Water Association, USA.
- Perry, E.C., A. Reeve, R. Sanborn, L.E. Marín y M. Villasuso, 1990, Response to Comment, "Geological and environmental, aspects of surface cementation, north coast, Yucatan, Mexico", *Geology*, 18 (8), pp. 803-804.
- Perry, E.C., G. Velázquez y L.E. Marín, 2002, "The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of northern Yucatan Peninsula, Mexico", *International Geology Review*.
- Perry, E.C., J. Swift, A. Reeve, R. Sanborn, L.E. Marín y M. Villasuso, 1989, "Geological and environmental aspects of surface cementation, north coast, Yucatan, Mexico", *Geology*, 17, pp. 818-821.
- Perry, E.C., L.E. Marín, J. McClain y G. Velázquez Olimán, 1995, "The Ring of Cenotes (sinkholes) northwest Yucatan, Mexico: its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub Impact Crater", *Geology*, 23, pp. 17-20.
- Pope, K.O., A.C. Ocampo, G. L. Kinsland y R. Smith, 1996, Surface expression of the Chicxulub Crater, *Geology*, 24: 527-530.
- Schmitter-Soto, J.J., F.A. Comín, E. Escobar Briones, J. Herrera Silveira, J. Alcocer, E. Suárez Morales, M. Elías Gutierrez, V. Díaz Arce, L.E. Marín y B. Steinich, 2002, "Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes (sinkholes) in the Yucatan Peninsula", *Hydrobiologia*, 467, pp. 215-228.
- Sharpton, V.L., G.B. Dalrymple, L.E. Marín, G. Ryder, B.C. Schuraytz y J. Urrutía Fucugauchi, 1992, "New links between the Chicxulub Impact Structure and the Cretaceous-Tertiary Boundary", *Nature*, 359, pp. 819-821.
- Sharpton, V.L., K. Burke, A. Camargo, S.A. Hall, L.E. Marín, G. Suárez, J.M. Quezada, P.D. Spudis y J. Urrutía Fucugauchi, 1993, "The gravity expression of the Chicxulub multiring impact basin: size, morphology, and basement characteristics", *Science*, 261, pp. 1564-1567.
- Sharpton, V.L., L.E. Marín, C. Carney, S. Lee, G. Ryder, B.C. Schuraytz, P. Sikora y P.D. Spudis, 1996, "A model of the Chicxulub Impact Basin based on evaluation of geophysical data, well logs, and drill core samples", en Ryder, G., D. Fastovsky y S. Garner (eds.), *Geological Society of America Special Paper*, 307, (portada), pp. 55-74.
- Steinich, B., G. Velázquez Olimán, L.E. Marín y E.C. Perry, 1996, "Determination of the ground water divide in the karst aquifer of Yucatan, Mexico, combining geochemical and hydrogeological data", *Geofísica Internacional*, 35, pp. 153-159.
- Steinich, B. y L.E. Marín, 1996, "Hydrogeological investigations in northwestern Yucatan, Mexico, using resistivity surveys", *Ground Water*, 34 (4), pp. 640-646.

- Steinich, B. y L.E. Marín, 1997, "Determination of flow characteristics in the aquifer in northwest Yucatan, Mexico", *Journal of Hydrology*, 191, pp. 315-331.
- Weidie, A. E., 1982, *Lineaments of the Yucatan Peninsula and fractures of the central Quintana Roo coast: Road log and supplement to the 1978 guidebook*, 1982, Geological Society of America Meeting Field Trip, 10, Yucatán, pp. 21-25.

LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA EN TABASCO: INUNDACIONES Y SU CONTROL

Jesús Gracia Sánchez y Óscar A. Fuentes Mariles

INTRODUCCIÓN

Durante la época de avenidas de 1999, las lluvias en el estado de Tabasco ocasionaron escurrimientos extraordinarios que aumentaron significativamente los gastos hacia el río Carrizal, comprometiendo a la ciudad de Villahermosa (Sánchez *et al.*, 2001). Sin embargo este es un fenómeno que regularmente ha ocurrido en la región, aunque en los últimos años se han acentuado los daños. Esto se debe al rápido aumento de la población en el área. Los daños son principalmente económicos y se originan por las inundaciones de las zonas urbanas y agrícolas, ruptura de bordos y daño a carreteras y construcciones. No se detectaron estadísticas específicas que permitan ilustrar el problema, sin embargo las fuentes periodísticas sí muestran claramente la trascendencia de los daños ocasionados durante las inundaciones.

El estado de Tabasco se caracteriza por ser el lugar de México con mayor disponibilidad de agua. La red fluvial de este estado (figura 1) está formada por el río Grijalva que nace en el estado de Chiapas y fluye en dirección sureste-noroeste hasta la presa Malpaso y continúa en dirección sur-norte hasta el embalse Peñitas, en donde ingresa a la planicie tabasqueña. El río Grijalva continúa en la misma dirección con el nombre de Mezcalapa hasta una bifurcación en donde una de sus ramas, el río Carrizal fluye de oeste a este hasta llegar a Villahermosa, la otra rama es el río Samaria.

En el tramo Peñitas-Samaria recibe la aportación de los ríos Camoapa y Platanar, después de la confluencia del río Carrizal con el de la Sierra se vuelve a tomar el nombre de Grijalva. En el tramo comprendido entre el entronque con el Carrizal y el sitio en donde la dirección cambia para ser suroeste-noroeste, el Grijalva recibe las aportaciones del río de la Sierra que a su vez incorpora a los Pichucalco, Tacotalpa y Teapa; este último recibe las aguas del río Puyacatengo. Antes de la descarga al mar del río Grijalva, recibe al Chilapa y al Usumacinta.



FIGURA 1. Sistema fluvial principal de Chiapas y Tabasco.

El río Carrizal tiene como afluente al Medellín, que va de sur a norte, al cual se incorpora el Samaria y más adelante desemboca en una zona baja, con pantanos, cerca de la costa del Golfo de México. Como la ciudad de Villahermosa se encuentra en una zona casi horizontal, queda circundada por ríos o planicies de inundación.

La red de drenaje cerca de Villahermosa es complicada. Para entender su funcionamiento debe considerarse que las lluvias más importantes de los estados de Chiapas y Tabasco ocurren de agosto a diciembre por lo que en estos meses se tiene más peligro de inundaciones. Dada la extensión del área de aportación pluvial, la ocurrencia de las lluvias no es uniforme o simultánea en toda la zona; sin embargo existen diferentes combinaciones de eventos que pueden poner en crisis al funcionamiento de toda la red y causar el desbordamiento de los ríos. Hasta la presa Peñitas los escurrimientos son regulados, pero en el resto de la planicie, sobre todo en el río de la Sierra, no existe control de las corrientes.

En términos generales, los niveles de la superficie libre del agua de los ríos Carrizal y de la Sierra dependen de los gastos aportados por ellos, de manera que si uno viene extraordinariamente crecido, causará una sobrelevación en el otro.

Así, de acuerdo con la figura 1, si el Usumacinta, que es uno de los ríos más caudalosos del país, al conducir una aportación intensa, puede producir un incremento de los niveles del agua en el tramo final del Grijalva y, en menor escala, en el Chilapa y llega a tener influencia en las descargas de los ríos Carrizal y de la Sierra. En particular, el río de la Sierra puede transportar un escurrimiento importante proveniente de los ríos Tacotalpa y Pichucalco, que son ríos sin control con un área extensa de aportación, lo cual puede contribuir a un mayor remanso en la proximidad de Villahermosa.

Hasta aquí queda claro que la descarga del río Carrizal, después de su paso por la ciudad puede estar limitada por los niveles altos del agua en su salida. A esto hay que añadir que se han observado cambios en la distribución de gastos en la bifurcación del río Mezcalapa para formar las corrientes Samaria y Carrizal. Esto ha producido el aumento en los gastos del Carrizal, por lo cual se ha incrementado el peligro de inundaciones en Villahermosa. Estos cambios en la repartición de gastos es un fenómeno común en las corrientes trenzadas y en bifurcaciones, debido al depósito de sedimento (Ashmore, 1982).

Finalmente, la conducción del agua del río Samaria también esta limitada, por lo que asciende su nivel de agua en la época de lluvias, pudiendo causar también inundaciones.

Conviene hacer notar que en la descripción realizada, se ha usado a la ciudad de Villahermosa como el punto principal para explicar los problemas del flujo de agua de la red de drenaje de los ríos, pero debe ser claro que estos problemas no sólo se concentran en esa ciudad. Durante la época de lluvias existen otros sitios en el estado con inundaciones, y por lo tanto con la consecuente pérdida de bienes materiales y en especial de cultivos. Lo anterior conlleva a la ruptura de bordos, los cuales muchas veces son caminos o carreteras. Con esto, además de la pérdidas por la inundación, hay que añadir los costos de reparación de las obras civiles, la interrupción de ciertas actividades económicas y las afectaciones que esto ocasiona durante su etapa de construcción, así como la comunicación terrestre por varios días.

El río Mezcalapa tiene un cauce más amplio que el río Samaria, con algunas islas, bancos de arena y zonas con erosión. En algunos puntos, la erosión de las márgenes pone en peligro las carreteras cercanas a su cauce. La Comisión Nacional del Agua (CNA) ha construido en determinados tramos de este río, diferentes obras de protección de taludes (espigones, recubrimientos, etc.).

En algunos tramos del río Carrizal se observa fuerte erosión de sus márgenes, esto se debe, entre otras razones, a las altas velocidades que alcanza en algunos sitios, especialmente en las curvas.

Un factor adicional que hay que tomar en cuenta en el funcionamiento del río Mezcalapa, es la descarga de la presa Peñitas, la cual debido a las necesidades de generación, puede aportar gastos del orden de $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ durante lapsos de

4 a 6 horas para cubrir la demanda de energía de las horas pico. Nótese en la figura 1 que si coincide dicha descarga con los flujos máximos de las avenidas por los ríos Camoapa y Platanar, entonces se compromete el funcionamiento de la bifurcación y por ende del Carrizal.

De hecho, en el río Carrizal existen otros problemas relacionados con el funcionamiento de la presa Peñitas, pues en el estiaje, en los fines de semana, existen fluctuaciones de los niveles de agua muy acentuados que podrían influir en la estabilidad de algunos taludes contribuyendo a su falla.

El río Grijalva es un ejemplo de un sistema fluvial donde la actividad humana influye de manera drástica en su comportamiento, como lo demuestra el cambio continuo, en los últimos siglos, de la morfología de la parte baja de la cuenca.

Tratando de visualizar el funcionamiento de todo el conjunto de toda la red se entenderá entonces por qué la ciudad de Villahermosa es tan susceptible a las inundaciones.

A escala geológica, los cambios fluviomorfológicos del sistema deltáico-lacustre en la parte baja de Tabasco han sido muy rápidos (Velázquez, 1994). La actividad volcánica en la parte alta de las cuencas, siempre ha dado lugar a una alta producción de sedimentos. Sin embargo, la deforestación aceleró los procesos sedimentarios, por lo menos desde el siglo XVI. Históricamente una característica particular de los ríos de planicie, como los del sistema fluvial del Grijalva, es la divagación de los cauces. Según Velázquez, 1994, los numerosos cauces nuevos y abandonados del sistema de los ríos Grijalva y Usumacinta son resultado de las constantes modificaciones del curso de las corrientes. El primer cambio de curso (llamado “rompido”, término local, para indicar la salida de un río de su cauce original y formar otro) documentado ocurrió en 1675, cuando una derivación en la margen derecha en el río Mezcalapa entre Huimanguillo y Cárdenas dio lugar a un río que posteriormente confluiría con el río de la Sierra (Velázquez, 1994).

Han existido varios “rompidos”, pero la situación actual puede entenderse a partir de la “reciente” construcción de las presas sobre el río Grijalva (figura 1), ya que redujeron significativamente los gastos durante las épocas de avenidas (Velázquez, 1994).

En la figura 2 se muestra la hidrografía del estado en el siglo XVI. En la figura 3 se muestra un resumen de los diferentes “rompidos” ocurridos. Es muy importante observar la tendencia general de toda la zona al cambio de cauce. Pero en particular nótese que en lo que actualmente es la bifurcación Samaria-Carrizal, existen cinco “rompidos” (Velázquez, 1994).

A escala geológica, los cambios fluviomorfológicos del sistema deltáico-lacustre en la parte baja de Tabasco han sido muy rápidos. La actividad volcánica en la parte alta de las cuencas, ha dado lugar a una alta producción de sedimentos.

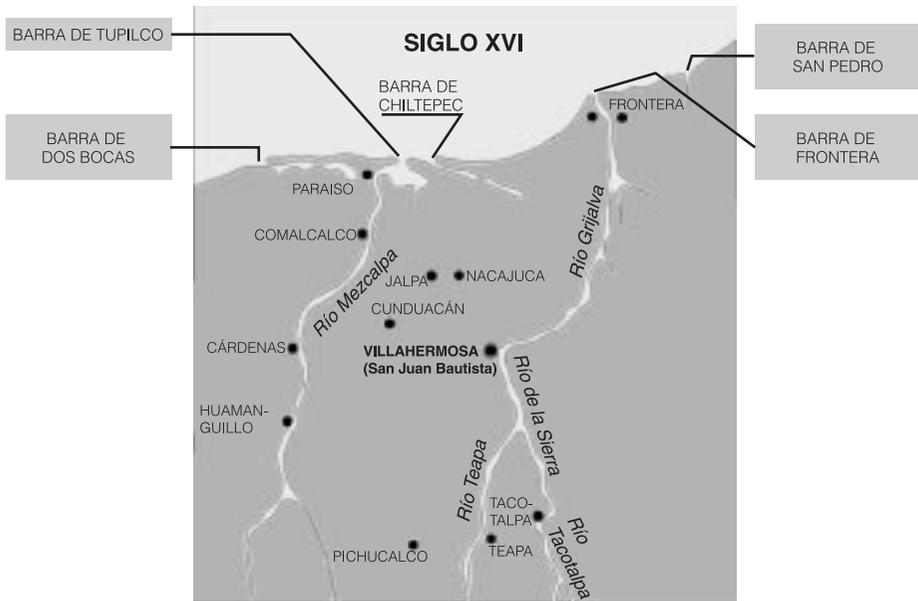


FIGURA 2. Sistema fluvial en el siglo XVI.

Fuente: Velázquez, 1994.

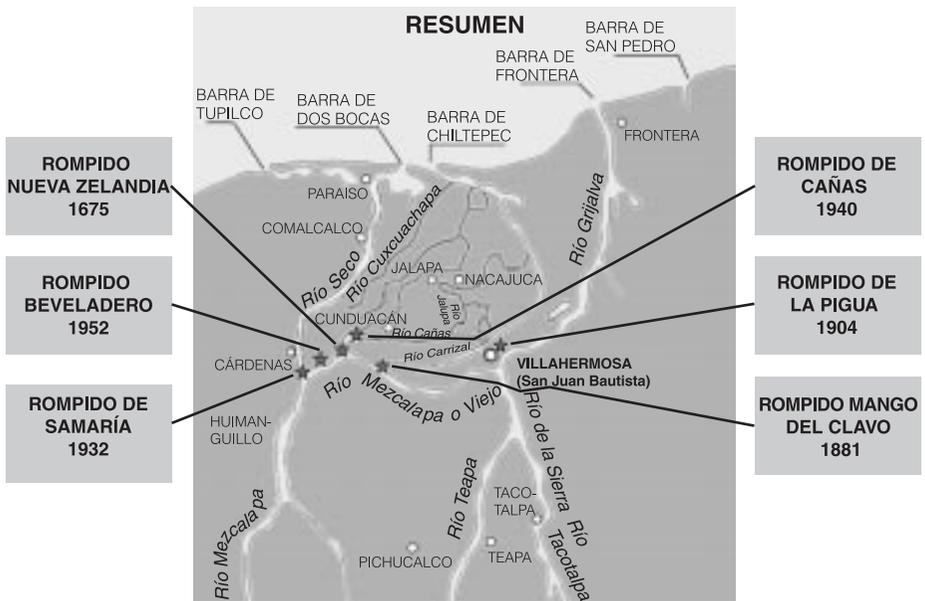


FIGURA 3. Sistema fluvial en el siglo XVI.

Fuente: Velázquez, 1994.

Un problema particular especialmente importante, se ubica en el funcionamiento de la bifurcación del Mezcalapa. En este sitio se ha observado un problema de depósito de sedimento que ha provocado la disminución de gastos en el río Samaria y el incremento hacia el río Carrizal, con el consecuente aumento del peligro de inundación para la ciudad de Villahermosa.

Con la construcción de la presa Malpaso se redujeron significativamente los gastos durante las épocas de avenidas en el Grijalva hacia Villahermosa. Con ello, el ancho natural del río Mezcalapa ha resultado mayor al necesario, para los gastos que ahora circulan en él y también el transporte sólido se ha alterado. Esto ha propiciado el depósito de sedimento (arena) en la bifurcación, causando el aumento del agua que se desvía hacia el Carrizal. También se ha traducido en que con el transcurso de los años ha existido una tendencia a aumentar la proporción original de los gastos por el río Carrizal. Sin embargo, durante la época de avenidas de 1999 este fenómeno hizo crisis dado lo extraordinario de los escurrimientos, entonces incrementaron significativamente los gastos hacia el río Carrizal comprometiendo a la ciudad de Villahermosa. En 1997, del aporte total del río Mezcalapa, el río Carrizal transportaba en torno a 34% y el Samaria 66%. Sin embargo, después de octubre de 1999, el río Carrizal (para un gasto en el río Mezcalapa del orden de $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ en la época de estiaje) transportó aproximadamente 47% y el Samaria el otro 53%. Esto muestra claramente la tendencia al aumento de los gastos por el río Carrizal (Sánchez *et al.*, 2001).

Actualmente se realizan estudios y mediciones para proponer las opciones de solución en la bifurcación, pues determinar su comportamiento se ha complicado debido al gran depósito de sedimento. Nótese que la medición de gastos líquidos y sólidos en ese sitio es difícil debido a las grandes dimensiones de las secciones transversales (hasta más de 1000 m de ancho), el movimiento lateral hacia el Carrizal y la rápida variabilidad de tirantes y gastos (Berezowsky *et al.*, 1990).

A partir de 1950 se empiezan a realizar obras para el manejo del agua (Velázquez, 1994). Por esas fechas se construyeron los primeros bordos de protección como por ejemplo: un bordo para proteger La Chontalpa y las cabeceras de Cunduacán, Jalpa y Nacajuca y el bordo Zavala-Samaria. Se efectuaron algunos cortes como: el Macayo, Corregidora, Pueblo Nuevo, Tacotalpa y Balancán. Y se construyeron los primeros drenes y desagües como Samaria-Mecoacán, Santa Teresa y Veladero, entre otros. Con el material excavado de los drenes se formaron caminos paralelos a los mismos que aún siguen funcionando.

Al cegar el río Viejo Mezcalapa se aminoraron mucho las inundaciones en Villahermosa. Es necesario también señalar que un buen esfuerzo por encauzar y ordenar las aguas del río Mezcalapa, fue la construcción del cauce piloto del río Samaria.

Adicionalmente a las grandes obras realizadas existe una vigilancia continua del sistema de drenaje y en especial de los bordos (Gobierno del Estado de Tabasco, 2002). Por ello las más recientes labores de protección han sido la protección de taludes, el dragado de algunos sitios y la rehabilitación de espigones. Sin embargo dado el acelerado crecimiento de la población la presión social demanda nuevas soluciones que requieren ser integrales con proyectos de gran envergadura y que por la falta de recursos económicos suficientes aún están por realizarse.

El disminuir solamente los gastos hacia el río Carrizal no evita las inundaciones en Villahermosa. También es necesario realizar el control de los ríos de la Sierra, ya que en caso de lluvia intensa en la zona montañosa de Tabasco, se pueden generar escurrimientos capaces de inundar a la ciudad aunque por el Carrizal fluya un gasto bajo. Adicionalmente, cuando el río Usumacinta conduce gastos grandes incrementa el tirante del río Carrizal disminuyendo su capacidad de conducción. De todo lo anterior la idea que debe prevalecer es que el problema de inundación debe abordarse en forma integral, es decir, pensando que el punto nodal es la ciudad de Villahermosa, no basta con resolver aisladamente el problema del río Carrizal, o el del Samaria o el del Usumacinta; sino que es necesario contemplar en forma conjunta el funcionamiento de todos ellos. De hecho existen diferentes estudios al respecto (p.e. Fuentes *et al.*, 2000), los cuales abordan la problemática desde puntos de vista particulares y también integrales. Los principales trabajos los han desarrollado la Comisión Nacional del Agua, Comisión Federal de Electricidad, Universidad Nacional Autónoma de México y recientemente la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Actualmente esta última institución realiza mediciones de agua y sedimento en diferentes corrientes del sistema de ríos. En este trabajo el concepto de integral se refiere al posible funcionamiento simultáneo (en condiciones críticas) de las diferentes corrientes. Evidentemente existen otras actividades complementarias que habrán de realizar los organismos correspondientes para complementar las soluciones integrales propuestas.

La información disponible señala que existen proyectos ya definidos de obras específicas que es necesario realizar. Y que aparentemente sólo la falta de recursos económicos, ha sido la limitante para realizar el control de la red de drenaje formada por los diferentes ríos.

Como consecuencia de las avenidas de 1999, se propuso la construcción de un estrechamiento sobre el río Carrizal (cerca de la bifurcación) para reducir los escurrimientos provenientes del río Mezcalapa hacia Villahermosa. Esta obra se planteó como provisional mientras se encuentra una solución satisfactoria al problema en la bifurcación. Una solución definitiva planteada es diseñar una estructura con compuertas que permita el control de gastos y niveles que garanticen la seguridad de la ciudad de Villahermosa. Con esto se trata de minimizar los efectos de las aportaciones que se tengan por los ríos que confluyen a la salida

del Carrizal, de la operación de la presa Peñitas y de las descargas de los ríos Camoapa y Platanar.

Nótese que el estrechamiento o la estructura con compuertas, no son soluciones completas, pues ellas probablemente inducirán un agravamiento del problema de sedimentación en el Mezcalapa, por lo que entonces sería necesario aumentar la altura de los bordos en el Mezcalapa. Debe entenderse que levantar la rasante de los bordos es muy costoso, porque muchas veces hay que aumentar el ancho de la base de los mismos o elevar caminos y carreteras lo cual implica prácticamente rehacerlas de nuevo.

Hasta la fecha se han tratado de evitar las inundaciones de Villahermosa controlando el comportamiento del río Carrizal, para lo cual se han levantando y reforzando bordos en los puntos críticos a lo largo de su recorrido por la ciudad. Sin embargo a pesar de los esfuerzos realizados, aún es necesario mejorar la protección contra inundaciones. Una solución claramente planteada e importante para este problema, ha sido la construcción de un canal dentro del cual se aloje el río Samaria; a esta obra se le ha denominado “Dren Samaria-Golfo”. Esta solución, aunque costosa presenta muchas ventajas, sin embargo antes habrá que resolver el problema en la bifurcación. También el canal denominado “Dren Victoria”, que parte de la unión del río de la Sierra con el Carrizal, permitirá desalojar los escurrimientos extraordinarios de la zona montañosa de Tabasco, reduciendo la posibilidad de inundar a Villahermosa. No existen en las referencias disponibles datos sobre los costos de las obras por realizar, sin embargo los autores consideran que el orden de magnitud de la etapa inicial debe ser superior a los 2000 millones de pesos (2003).

La naturaleza del funcionamiento del sistema fluvial de Tabasco hace que, debido a la gran magnitud de los escurrimientos y dada la gran dinámica hidromorfológica natural de sus ríos, exista una tendencia natural a las inundaciones. Esencialmente los niveles bajos de la planicie y la gran cantidad de sedimento transportada por las corrientes producen estos fenómenos. Las obras civiles construidas en relación con el drenaje fluvial como son bordos, puentes y espigones, hacen que ahora existan zonas restringidas al movimiento de las corrientes. Si bien con el tiempo y las obras construidas se han disminuido la frecuencia de las inundaciones, esto es difícil de mantener en una zona tan activa desde el punto de vista fluvial. Sólo el constante empleo de recursos económicos en mantenimiento y obras nuevas podrá para el futuro, hacer que el estado tenga mayores márgenes de seguridad en cuanto a las inundaciones.

El problema de la red de drenaje fluvial del estado de Tabasco es integral, donde no es conveniente plantear soluciones particulares del funcionamiento sino de toda la red de drenaje. Por ello es necesario realizar un acuerdo común entre las distintas autoridades del gobierno del estado, CNA, CFE, LOS CENTROS DE INVESTIGACIÓN NACIONALES y la población para apoyar las soluciones. Con-

sidérese que en el estado existen más de 300 km sólo de bordos, esto muestra que al menos en el mantenimiento de los bordos existentes la cantidad de recursos económicos es muy alta.

Existen varios planteamientos de las diferentes obras que conviene realizar para mitigar las inundaciones en Tabasco, pero conviene destacar como trabajos importantes a efectuar en el futuro cercano: resolver el problema del funcionamiento de la bifurcación del Mezcalapa, la construcción del Dren Samaria-Golfo y del Dren Victoria para el desalojo de los gastos importantes de los ríos de la Sierra, además de realizar los trabajos ordinarios de mantenimiento y reparación tanto de bordos como de espigones.

Mientras se implantan las soluciones técnicas, es posible pensar en la instalación de sistemas de alerta temprana que prevengan los posibles escurrimientos extraordinarios en diferentes puntos estratégicos, evidentemente Villahermosa es uno de los más importantes.

BIBLIOGRAFÍA

- Ashmore, P.E., 1982, "Laboratory modelling of gravel braided stream morphology", *Earth Surf. Proc. Land.*, 7, pp. 201-205.
- Berezowsky V., M. *et al.*, 1990, "Estudio en Modelo Matemático del Fenómeno de Arrastre del Río Mezcalapa Samaria", en *Informe Técnico del Instituto de Ingeniería, UNAM, elaborado para la CNA*, vol. II: *Anexos 5*, México.
- Domínguez M., R., E.E. Carrizosa, G.E. Fuentes M. y M.L. Arganiz J., 2000, "Estudio hidrológico de la cuenca baja de los ríos Grijalva y Usumacinta del estado de Tabasco", en *Informe Técnico del Instituto de Ingeniería, UNAM, elaborado para la CNA*, México.
- Fuentes M., O.A., F. De Luna C. y J.J. Carrillo S. *et al.*, 2000, "Simulación numérica del flujo en cauces y en las planicies que podrían inundar la cuenca baja del río Grijalva estado de Tabasco", en *Informe Técnico del Instituto de Ingeniería, UNAM, elaborado para la CNA*, México.
- Gobierno del Estado de Tabasco, 2002, *Plan de Desarrollo del Estado de Tabasco 2002-2006*.
- Maza A., J.A., 1990, *Introduction to River Engineering*, Università Italiana per Stranieri, Italia.
- Sánchez B., J.L., V. Franco, J. Gracia S. y O.A. Fuentes M., 2001, "Terminación del modelo físico del río Mezcalapa en la bifurcación del río Carrizal-Samaria en el estado de Tabasco", en *Informe Técnico del Instituto de Ingeniería, UNAM, elaborado para la CNA*, México, julio, 43 pp.
- Velázquez V., G., 1994, *Los Recursos Hidráulicos del Estado de Tabasco*, UJAT, Centro de Investigación de la División Académica de Ingeniería y Tecnología.

MANEJO INTERNACIONAL DE AGUA EN LA FRONTERA NORTE. EL CASO DEL RÍO COLORADO Y LA ZONA TIJUANA-MEXICALI-SAN LUIS (TMSL)

Jesús Gracia Sánchez y Rafael B. Carmona Paredes

INTRODUCCIÓN

La escasez natural del agua en el sitio, el acelerado crecimiento de los centros urbanos como producto de las fuentes de trabajo ofrecidas en Estados Unidos, la gran presión de los centros agrícolas por crecer y el hecho de que el agua recibida es necesario restituirla a Estados Unidos por el río Bravo, son los principales factores que explican la importancia del manejo del agua en la zona TMSL.

El área de estudio pertenece a una de las trece regiones (región I) administrativas en que la CNA ha dividido el país con un enfoque hidrológico. Esta zona comprende a toda la península de Baja California y la cuenca mexicana del río Colorado, por lo que incluye al municipio de San Luis Río Colorado en Sonora. El clima se considera extremo, con temperaturas mínimas de 0°C hasta -16°C, media de 20°C y máximas hasta de 52°C. La precipitación media anual es de 264 mm, lo cual muestra la poca disponibilidad de agua por lluvia en el sitio.

LAS PRINCIPALES FUENTES DE ABASTECIMIENTO HIDRÁULICO

Superficiales

El río Colorado y el río Tijuana. El río Colorado proporciona a México 1850 Mm³ cada año con muy pocas variaciones a lo largo del año, gracias a la regulación de los escurrimientos del río en el lado norteamericano. México recibe el agua en la presa Morelos desde donde se suministra tanto a ciudades como a zonas agrícolas.

El río Tijuana alimenta esporádicamente a la Presa Abelardo L. Rodríguez, llenándola en promedio cada 8 años, con escurrimientos extraordinarios durante los primeros meses del año. El volumen útil de la presa es de unos 80

Mm³ que se aprovechan, cuando hay agua, para suministro a Tijuana, Rosarito y Ensenada.

La precipitación nacional media anual es de 772 mm, en tanto que en TMSL es de 264 mm lo cual muestra la poca disponibilidad de agua por lluvia en el sitio. Esto repercute tanto en los bajos escurrimientos como en la pobre recarga de los acuíferos.

Subsuperficiales

Existen 19 acuíferos en la zona fronteriza de la Zona TMSL; en el estado Baja California se encuentran 17 y dos en el estado de Sonora. La extracción total del agua de los acuíferos de la zona fronteriza TMSL alcanza la cifra de 1 417 Mm³/año, provenientes principalmente de los acuíferos Mexicali (1 100 Mm³/año) y Mesa Arenosa (200 Mm³/año). Por usos, el agrícola es el que más extrae, 74% del total, seguido del público 19%, el industrial 4% y finalmente el doméstico 3%.

El balance anual global de los acuíferos es negativo (-467 Mm³/año); lo que implica que este volumen utilizado proviene de la reserva de agua almacenada no renovable. En el caso de los acuíferos: Maneadero (-11 Mm³/año), Mexicali (-400 Mm³/año), Mesa Arenosa (-50 Mm³/año) y Rosarito (-1 Mm³/año) su comportamiento muestra una reducción de los niveles freáticos y por consiguiente en sus correspondientes volúmenes almacenados.

La idea que debe prevalecer en cuanto a las aguas subterráneas es que su aprovechamiento es intensivo para la demanda de todos los usos, sobre todo el agrícola. En la actualidad algunos acuíferos han sido sobre-explotados y convendría, desde el punto de vista práctico y ecológico, disminuir el déficit para disponer del recurso más adelante.

El origen del problema hidráulico

La zona en estudio es la que presenta el mayor crecimiento social de la frontera norte, y en especial en el rubro urbano. De los 7 millones de habitantes estimados en el año 2000 en la franja fronteriza México-Estados Unidos, 40% se concentra en la zona TMSL. De la población total, 94% es de tipo urbano y sólo 6% es rural.

En contraste, el sector agrícola representa 92% de la demanda total en el área de estudio y se riega 98% de la superficie regable. En el servicio de agua potable, las pérdidas se calculan de 35%, con consumos per cápita de 220 L/hab/d. Esta combinación muestra claramente que la incidencia en la mejora de la eficiencia del riego, es más relevante que la mejora en la eficiencia del agua potable para las ciudades de la zona TMSL.

La escasez del agua en las zonas de mayor desarrollo económico y crecimiento demográfico, como es la zona TMSL, conduce, en la medida en la que el

consumo crece, a que la disponibilidad de agua per cápita se reduzca drásticamente. Por ello, esta zona enfrenta una situación donde la demanda de servicios crece aceleradamente y, en su insatisfacción, ocasiona el deterioro del bienestar social. Este panorama crea una gran presión sobre sus escasos recursos hidráulicos y dificultades para habilitar esquemas financieros que sirvan para enfrentar el problema del agua.

Además de los Distritos de Riego tradicionales, existen distritos para el desarrollo rural donde se han implementado las Unidades de Riego para Desarrollo Rural (Urderales), de los cuales se riega en promedio 54% de la superficie total. En cuanto a los volúmenes extraídos para el uso agrícola, 80% se destinan a los Distritos de Riego y 20% a los Urderales.

Históricamente los Urderales han tratado de ser una salida a la presión por incrementar la superficie de riego, pero en realidad se han convertido en una presión adicional al uso del agua, pues la superficie regada (627 000 ha) es muy inferior a la regable (826 000 ha). Esto hace que 199 000 hectáreas sean improductivas por falta de agua, aún cuando se ha recurrido a la sobreexplotación de acuíferos. Recuérdese que en la zona el sector agrícola es el principal demandante de agua (92% de la demanda total) y por lo cual el riego es el principal factor en la sobreexplotación.

La zona en estudio se caracteriza por tener un volumen limitado de agua y una fuerte sobre explotación de sus acuíferos subterráneos, lo que sugiere reducir la disponibilidad actual para alcanzar el equilibrio. Además, la tasa de crecimiento de la demanda urbana es mucho mayor que el riego, pues mientras los centros urbanos se encuentran en constante y rápido desarrollo, las zonas agrícolas ven amenazada su existencia por la tendencia a destinar el agua a las zonas urbanas.

El conflicto del agua entonces puede entenderse fácilmente si se considera que a corto plazo, desde el punto de vista práctico, no hay (ni habrá) más agua que la que actualmente existe y será necesario decidir quién la usará, los centros urbanos o los agrícolas. Esto más que un problema técnico es social. Comparativamente, los usuarios del agua de riego requieren de mayores cantidades de agua que los centros urbanos. De aquí la idea que ahorrando agua en el riego, ésta puede destinarse al uso urbano. Esto evidentemente es cierto, es decir, en la situación actual, es posible mejorar la eficiencia de las zonas de riego, sin embargo de todos modos quedará en la práctica el problema de definir el criterio para determinar si esa agua ahorrada deberá permanecer en los centros agrícolas o deberá destinarse a los centros urbanos. Conviene señalar que parte del agua usada proviene de acuíferos que en la actualidad están sobreexplotados y que es necesario regenerar.

LA IMPORTANCIA DEL ASPECTO INTERNACIONAL EN EL PROBLEMA HIDRÁULICO

La vecindad con Estados Unidos ha favorecido el establecimiento de una industria maquiladora (en la franja fronteriza) que ha crecido de tal manera que en pocos años se ha constituido como la 2ª fuente de divisas y una de las principales generadoras de empleo industrial del país. Esto va acompañado de la necesidad de un gran crecimiento del sector de servicios. Además, en algunas zonas de riego se ha propiciado una agricultura de exportación que también aporta divisas y empleos.

El aprovechamiento de las aguas del río Colorado está regido por el Tratado sobre Aguas Internacionales celebrado en 1944, donde se estipula que Estados Unidos proporcionará a México 1850 Mm³ cada año. Para ello se emplea la presa Morelos que suministra el agua tanto a ciudades como a zonas agrícolas. En este tratado también se convino en forma consecuente, la manera como México retribuye a Estados Unidos el agua a través del río Bravo.

Se calcula que las grandes ciudades en toda la frontera en el año 2025, tendrán 90% de la población total (contra 85% actual), y seguirá siendo la zona TMSL la de mayor concentración de población.

Por supuesto que las condiciones geográficas y climatológicas de la zona TMSL, aunada a la compleja relación política y económica de México y Estados Unidos, han propiciado en esta región un desarrollo económico que genera importantes movimientos migratorios y de crecimiento en las principales ciudades. Este desarrollo enfrenta a dos fuerzas que compiten por el agua, una el crecimiento urbano y la otra el desarrollo de la zonas de cultivos. Ambos grupos presionan por el agua, pero aparte existen otras fuerzas que intentan la preservación de las fuentes subterráneas y la preservación de la calidad del agua.

Es recomendable desarrollar una Política Integrada de Apoyo al Sector Agropecuario Nacional, en la que se defina el papel de la zona TMSL, que especifique el desempeño que se pretende para ese sector y por lo tanto el de su población asociada. Todo esto dentro del modelo de desarrollo elegido y congruente con los instrumentos de apoyo tales como créditos, precios de insumos y productos, comercialización, etc., y en donde se revisen los subsidios que normalmente han favorecido a la agricultura de riego respecto a la de temporal. El estudio de los subsidios, además de situar en un nivel más justo a los agricultores en general, impactaría directamente en una mejor valoración del agua por parte de los usuarios de riego y consecuentemente en un uso más eficiente.

Es necesaria una política de estado para la zona TMSL, que deberá insertarse en la Política de Desarrollo del país en todos sus rubros, de modo que su gran capacidad de generación de empleos, divisas y de derrama de ingresos (claramente superior a la del resto del país), no se debilite por la excesiva presión sobre sus limitados recursos hidráulicos. Recuerde que del agua que llega de

Estados Unidos por el Colorado, hay que restituir la cantidad convenida por los estados vecinos al río Bravo.

ANÁLISIS DEL PROBLEMA HIDRÁULICO

Existen estudios de tecnificación desarrollados por la CNA para la zona fronteriza, especialmente para la zona TMSL. Dichos trabajos han sido realizados para buscar desde el punto de vista de planeación las alternativas que permitan resolver la problemática del sitio y han mostrado la posibilidad de aumentar las eficiencias actuales de conducción y aplicación, que son de 37% y 55%, respectivamente.

El incremento en la eficiencia del riego puede verse como la reducción en el coeficiente de riego q definido como el volumen de riego por año y por hectárea, sin afectar la producción, o mejorándola. Nótese que en realidad q es una equivalencia de la lámina bruta de riego. De acuerdo con los datos arriba expuestos, la sobre explotación de los acuíferos puede evitarse reduciendo el coeficiente de riego a 84.5% del valor actual, esto es ahorrando 15.5 litros de cada 100, o regando 1 184 ha con el volumen usado para 1 000.

Mejorando más el riego, ya sin sobre explotación de los acuíferos, se puede pasar de 98% de la superficie regable a 100% reduciendo el coeficiente de riego actual a 82.8%, es decir, regando 1 208 ha con el volumen que actualmente se usa para regar 1 000.

A partir de ese valor, si se eficientiza aún más el riego se podrán regar más tierras o dar más agua a las ciudades, o ambas cosas. La figura 1 muestra distintas posibilidades, según la reducción del coeficiente de riego actual. El parámetro r en el eje horizontal indica el factor en el que se puede incrementar la superficie de riego, mientras que el parámetro t en el eje vertical es el factor en el que se puede incrementar el abastecimiento a zonas urbanas.

Así, si se consigue reducir el coeficiente de riego actual a 70%, se podría incrementar la superficie regada en 19%, sin dar más agua a las ciudades, o se podría multiplicar por 2.5 el volumen que actualmente se destina a los centros urbanos, sin abrir más tierras de riego. Pero también se podría aumentar en 10% la superficie de riego y multiplicar por 1.7 el gasto destinado a las ciudades, por ejemplo.

Como se puede observar en la figura 1, la magnitud de t (incremento del abastecimiento de las zonas urbanas) es mucho más sensible que r (incremento de la zona de riego) lo cual significa que con los ahorros de agua para riego, no se aumentan significativamente las áreas de riego, pero si es posible satisfacer sobradamente la demanda urbana. Nótese que la decisión de seleccionar en que proporción se destinará el agua a cada uso ya no es un problema técnico sino

social. Por supuesto que en primera instancia, lo más deseable es tratar de que el agua ahorrada, sea el agua que se quede en los acuíferos (disminuir la extracción) y luego al alcanzar el equilibrio, entonces proceder a decidir la proporción que se dará al uso del agua. Conviene aclarar que en la figura 1 se han incluido valores teóricos de q hasta de 0.5, sin embargo en la práctica probablemente sea posible llegar fácilmente sólo hasta valores de 0.7.

A pesar de lo anterior, conviene recordar que en el corto y el largo plazo los recursos hidráulicos son insuficientes para dar satisfacción a la demanda de todos los usos. Por ello habrá que extender entre todos los sectores involucrados la conciencia del valor del agua y de los beneficios derivados de un uso más eficiente. Igualmente habrá que impulsar que el agua sea considerada prioritariamente en los programas de desarrollo y promoción de inversiones de los gobiernos locales.

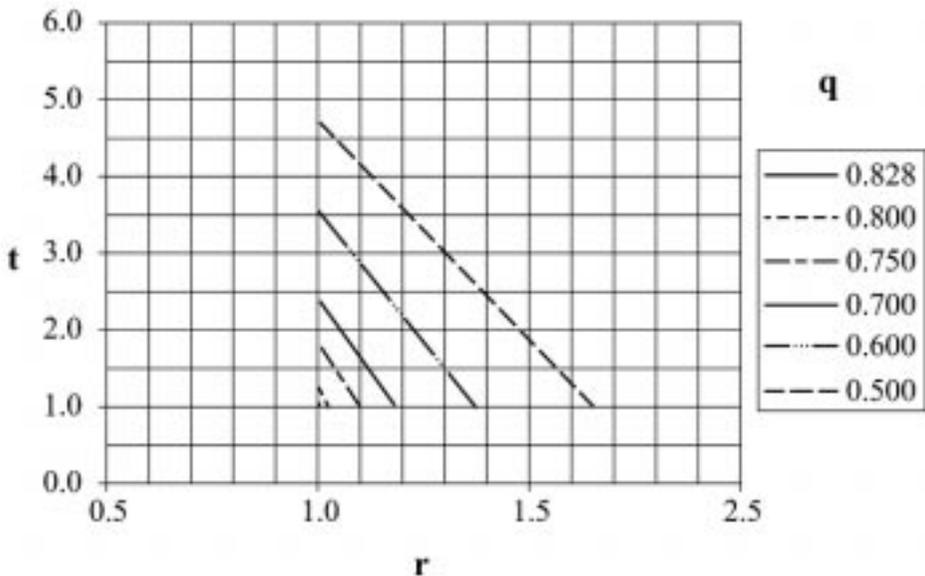


FIGURA 1. Relación del coeficiente de riego con la superficie de riego y de abastecimiento urbano. Coeficiente de riego q con los parámetros de superficie de riego r y de abastecimiento de zonas urbanas t .

Las recomendaciones obvias para mejorar la eficiencia del uso del agua son: elevar la eficiencia en todos los usos, especialmente en el riego; racionalizar el consumo; promover el reúso; y la protección de los recursos, en particular los acuíferos sobreexplotados.

Es muy importante la identificación de los volúmenes de aguas residuales disponibles y de los usuarios potenciales de aguas tratadas dentro de los que se encuentran el riego de ciertos productos y la generación de energía.

Conviene recordar la necesidad de desarrollar o adaptar tecnologías aún no aprovechadas en nuestro país, a través de la implementación de proyectos piloto que permitan evaluarlas técnica y económicamente hasta convertirlas en soluciones reales. En este aspecto se tratarían los dos casos más importantes: la construcción de plantas desaladoras y de plantas potabilizadoras (de tratamiento).

También es necesario seguir investigando sobre la posibilidad de que las aguas residuales tratadas sirvan para la rehabilitación (inyección) de acuíferos. Se ha dicho que la resistencia social es el principal obstáculo, pero no es así, antes de poner en práctica esta posibilidad se deben resolver dos problemas muy importantes: uno el de hacer costeable el tratamiento y otro, el garantizar la seguridad para hacer la inyección sin dañar las características del agua del acuífero. Se dan casos donde es necesario mejorar tanto la calidad del agua para poder inyectar, que es mejor reusarla en la superficie y beneficiar al acuífero al reducir la extracción.

LAS SOLUCIONES

La principal es hacer más eficiente la infraestructura hidroagrícola. Para ello se requiere maximizar las eficiencias mediante la adecuación de tecnología. En este rubro conviene destacar que el uso de la tecnología de punta como la aspersión, el goteo, el riego intermitente y las conducciones cerradas, no necesariamente son las alternativas más apropiadas para mejorar la eficiencia del riego, cuando hay carencia de recursos económicos. Las técnicas de riego tradicionales, como la de riego por gravedad, son susceptibles también de ser mejoradas, pues aun dentro de sus limitaciones, la técnica del “corte posterior”, el diseño de parcelas y la racionalización de las láminas de riego acordes con el momento de riego y el uso consuntivo, son alternativas que conviene practicar, aunque sea temporalmente, mientras se dispone de los recursos económicos para implementar la tecnología de punta. En otras partes del país, la disminución de los volúmenes de agua para riego (por la escasez) hacen que las láminas empleadas sean menores, pero esto no implica que se haya mejorado la eficiencia. Mejorar el uso del agua en una zona de riego, implica en muchos casos esfuerzos principalmente operativos, administrativos y de organización, sin embargo en otros, implica introducir capital y esto no siempre está en posibilidad de realizarlo el agricultor.

Un problema que es importante señalar es el relacionado con el manejo del agua, ya que si bien la CNA es el principal administrador, muchas veces el manejo a nivel parcelario es responsabilidad de los usuarios, que son quienes la ad-

ministran en la zona de riego desde el punto de vista agrícola. Esto hace que la CNA proporcione el agua en “bloque” a la entrada de la zona de riego, pero la distribución local depende de los usuarios aunque no es posible distinguir y, por lo mismo, favorecer a aquellos usuarios que manejan mejor el agua de aquellos que no lo hacen. Una tendencia actual en el suministro del agua, es a proporcionarla a todo aquel que la solicite (cuando sea posible). Sin embargo la nueva tendencia deberá ser el proporcionar el agua solamente a aquél que demuestre usarla eficientemente, para lo cual será necesario medir bien su consumo.

Para el sector público urbano se requiere la eficientización de los sistemas de agua potable. En esto evidentemente juega un papel muy importante la rehabilitación de los sistemas actuales. Pero hay trabajos complementarios que es necesario desarrollar en paralelo como son: la instalación de medidores en las tomas domiciliarias hasta alcanzar la cobertura de 100%. La implementación de plantas de tratamiento terciario en aquellas ciudades grandes y medias cercanas a los sitios en donde sea posible utilizar la estrategia del reúso para liberar agua potable. Tecnificación de los procesos productivos en las fábricas, de forma que se reduzca el consumo unitario. En las zonas costeras la construcción de plantas desaladoras que incrementen la oferta a las grandes ciudades para satisfacer la demanda urbana, como son los casos de Tijuana y Ensenada.

El primer problema importante es el otorgarle un valor económico al uso del agua. Esto puede hacerse mediante la correcta medición del consumo de todos los usuarios (urbanos, rurales, industriales y agrícolas). Con ello se otorgará la concesión del agua de acuerdo al uso y a las necesidades reales, de donde se establecerá el cobro a los usuarios y el establecimiento de tarifas diferenciales. Por supuesto para esto se requiere que la medición sea justa, eficiente y con un mecanismo de pago expedito.

El segundo aspecto es la implementación de los mecanismos de compra de derechos de agua. El sector urbano adquirirá derechos de uso de agua del sector agrícola sólo cuando sea benéfico para ambas partes.

También se requiere el desarrollo institucional de los organismos operadores público-urbanos y de acciones que consoliden a dichos organismos en las áreas: administrativa, comercial, operativa, financiera y de planeación. Para ello, la CNA ya ha iniciado procesos de descentralización y reestructuración institucional y ha propiciado el establecimiento de una política de Estado para la zona TMSL que deberá integrarse a la Política de Desarrollo del país.

Además, es necesario reestructurar y reordenar las asignaciones: se entiende que el Estado dispone de los instrumentos para reglamentar la extracción de las aguas nacionales, aunque dado el alto costo político de acciones de tal naturaleza, es previsible que en el futuro el agua quede más sujeta a las leyes de la oferta y la demanda. Es decir la tendencia es a ser destinada a aquellos usos y usuarios que le otorgan el mayor valor económico. Ello implica que el uso urbano-industrial

podría convertirse en el mayor captador de los derechos de agua y que en la actualidad detentan los usuarios agrícolas.

Al igual que en el resto del país, debe existir una campaña para la protección ambiental y especialmente en lo que respecta a la descarga de aguas residuales. En realidad estos aspectos ecológicos están vigilados por una gran cantidad de organismos nacionales e internacionales. Sin embargo, en el caso de la zona TMSL un problema característico es la necesidad de disminuir la extracción de los acuíferos. Aunque existe la alternativa de recargar con la inyección de aguas tratadas, ésta tiene riesgos, pues en el caso de que la calidad del agua inyectada no mantenga su calidad, se corre el riesgo de dañar con poca agua el agua de todo el acuífero. Por ello, ésta es una solución que deberá ser aplicada cuando se pueda garantizar el funcionamiento de las plantas con altos niveles de seguridad. En el corto plazo convendría iniciar la disminución de la extracción de los acuíferos Mexicali y Maneadero para reducir la sobreexplotación. Esto deberá estar acorde con la eficientización de los sistemas de riego para evitar los déficit temporales.

Un problema adicional, pendiente de resolver, es la rehabilitación del Delta del Colorado, donde existen grupos humanos que dependen de la protección de esta zona, además de la necesidad de conservación de la flora y fauna del sitio.

En el financiamiento de las obras y acciones programadas para satisfacer las demandas de la población en lo referente a los servicios de agua potable, alcantarillado, saneamiento y riego, se debe considerar la participación de los gobiernos federal y estatales, aportaciones de usuarios y organismos operadores, y recursos vía crédito tanto de la banca nacional como internacional

Es de fundamental importancia el pago de los derechos por extracción y uso de agua a la CNA, pues en la actualidad no están siendo totalmente cubiertos. Esta es una medida muy importante para implementar los mecanismos de racionalización, control y planeación del agua. En particular se requiere de la gestión del gobierno federal para que se integren a la cartera de contribuyentes los usuarios agrícolas que representan el mayor consumidor de agua de la franja fronteriza. Por supuesto el pago de derechos de agua está íntimamente ligado a la cobranza, por lo cual la estructura de los organismos encargados de realizarla deberá ser reforzada.

Finalmente, en lo que concierne a la eficientización del uso agrícola, es la acción de menor costo por m³ recuperado (pues es la acción que mayor volumen de recuperación trae consigo), pero también es la que mayor tiempo requiere para su implementación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Además de mejorar la eficiencia del uso del agua, desde el punto de vista técnico se sabe que existen diferentes soluciones para proveer de agua a los centros urbanos, entre ellos se encuentra la desalación del agua del mar y el tratamiento de aguas residuales. Ambas soluciones son muy socorridas (y atractivas) desde el punto de vista de planeación, sin embargo en la práctica, hasta el momento, no existen en México suficientes antecedentes que permitan llevar esas tecnologías a la producción a gran escala. En otras palabras, se sabe que dichas alternativas se han empleado con éxito en otros países, sin embargo en México no existe ningún caso real en operación a la escala necesaria para abastecer a una ciudad. Es claro que el alto costo de desalar o tratar el agua es el principal obstáculo para concretar plantas que permitan aumentar la disponibilidad del agua. Se considera que cuando la escasez del agua induzca el aumento del valor económico de las fuentes actuales, se volverán competitivas las opciones de desalación y tratamiento. Esto seguramente es cierto, sin embargo también lo es el hecho de que el bajo costo actual del agua, hará que por largo tiempo sea más atractivo intentar utilizar el agua dedicada al riego. Esto vuelve a incidir en el problema social pero ahora planteado de la siguiente forma: seguramente los usuarios de los centros urbanos estarán dispuestos (y podrán) pagar un mayor precio por el agua que los centros agrícolas; esto creará una mayor presión en la venta de los derechos del agua de las zonas de riego para llevarla a los centros urbanos. Nótese que el problema social provendrá de que el número de habitantes será mucho mayor en los centros urbanos que en los rurales, por lo cual su presión será mayor.

Existe una gran cantidad de información sobre el problema aquí presentado y sus posibles soluciones. De ella se proponen tres grandes directrices a seguir:

Aspecto Técnico. Incrementar la eficiencia en el uso del agua tanto en las zonas urbanas como en las de riego. Esto implicará favorecer con la disposición del agua, a aquellos usuarios que demuestren un mejor aprovechamiento del recurso. Realizar los proyectos técnicos que conduzcan a disponer en el corto plazo de plantas piloto desaladoras y de tratamiento que sirvan como modelo para generar a mayor escala agua para las ciudades.

Aspecto administrativo. Reorganizar los mecanismos para realizar la administración y cobranza real de los derechos de agua de los diferentes usuarios.

Aspecto social. Promover la organización social que permita acordar entre las autoridades y la población la política de uso y destino del agua en la zona.

El tercer aspecto es el social. Este se detecta como el problema más importante, pues es necesario promover la organización social que permita acordar entre las autoridades y la población, la política de uso y destino del agua en la zona. Nótese que si opta por iniciar con la mejora de las eficiencias del uso del agua para riego, habrá que decidir el uso de esa agua ahorrada, pues una primera

opción es que el agua se emplee en la misma zona de riego donde se ha mejorado la eficiencia. Pero otra alternativa es llevar el agua ahorrada a los centros urbanos, para lo cual será necesario resolver el problema de la venta de los derechos de agua. Todo esto será sencillo si todos los involucrados están de acuerdo con el uso (destino) del agua de la zona y si la legislación existente es adecuada.

BIBLIOGRAFÍA

- CNA, 1999, *Estrategia de Gran Visión y Manejo de Agua en las Ciudades y Cuencas de la Frontera Norte, en el Periodo 1999-2005*, CNA, Sistemas Hidráulicos Ambientales.
- COCEF-BECC, 2002, “Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza”, en *Web Site*.
- EPA, 2003, “U.S. Environmental Protection Agency”, en *Web Site*.
- IBWC, 2002, “International Boundary and Water Commission”, en *Web Site*.
- SEMARNAT-EPA, 2002, *Frontera 2010: Programa Ambiental México Estados Unidos*, Semarnat-EPA.

CIUDADANÍA Y GOBERNABILIDAD EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO-GRANDE

*José Esteban Castro Mussupappa, Karina Kloster,
María Isabel Studer Noguez y María Luisa Torregrosa*

INTRODUCCIÓN

A comienzos del siglo XXI México enfrenta múltiples retos para conciliar la oferta con la demanda de agua a nivel nacional. Estos retos se acentúan en los lugares donde existe una mayor escasez del recurso, como es el caso de la cuenca del río Bravo-Grande, que, además de este problema, enfrenta la situación de que el río constituye parte de la frontera internacional entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América y porque importantes acuíferos subterráneos son compartidos por ambos países. Por otro lado, tanto el crecimiento demográfico como el desarrollo industrial y agrícola de la zona producen otras consecuencias, como son la contaminación y la sobrexplotación de los recursos, lo que impone la necesidad de crear una visión de largo plazo con vistas a la preservación y sustentabilidad del agua en la región a la vez que asegurar el abasto de los requerimientos que plantea el desarrollo económico y social.¹

¹ Aunque la agenda mexicana de problemas vinculados al agua es vasta, el reto más importante proviene de los marcados contrastes en la disponibilidad del agua en el país que imponen fuertes condicionamientos al diseño de políticas públicas que garanticen el crecimiento económico y la estabilidad social en todo el país. Por ejemplo, el norte y el Altiplano, regiones áridas o semiáridas que cuentan con un escurrimiento medio anual de 28% del total nacional, representan dos terceras partes de la superficie y de la población nacional y generan 84% del PIB total del país. El grueso de la actividad industrial y de comercio exterior así como la mayoría de las áreas habitadas con riego se localizan en esas zonas, aunque su disponibilidad promedio de agua per cápita es, por ejemplo, ocho veces menor que en el sureste.

Aún más, la competencia por el agua en el norte de México se ha incrementado con el significativo crecimiento demográfico e industrial que dicha zona ha experimentado en las últimas décadas, y en especial con la entrada en vigor del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994. Se calcula que aproximadamente 10 millones de personas viven en la cuenca del río Grande-río Bravo y que dicha población puede duplicarse en 30 años. Solamente en los últimos cinco años, más de un millón de mexicanos se han establecido en la zona fronteriza, y

Desde nuestra perspectiva, estos retos sólo pueden ser enfrentados mediante la participación conjunta del Estado y de la sociedad, en tanto beneficiarios y corresponsables en la gestión sustentable del recurso. En este sentido, la organización de la gestión a nivel de la cuenca constituye el instrumento idóneo para la conformación de un espacio socio-territorial que garantice la gobernabilidad del agua. Esto es así porque la creación de una unidad socio-territorial a nivel de cuenca hidrológica constituye un modo social de asumir la construcción de un territorio en el cual se toma en cuenta no sólo el agua como recurso sino también el conjunto de condiciones sociales y medioambientales que determinan el ciclo de su reproducción. En efecto, la cuenca es el espacio donde cohabitan grupos sociales diferenciados cultural y económicamente, los que a pesar de haber sido separados arbitrariamente por razones geopolíticas continúan reproduciéndose y compartiendo un mismo espacio socio-medioambiental que trasciende las fronteras nacionales.

En este artículo trataremos de explorar la complejidad que supone enfrentar este reto en la cuenca del río Bravo-Grande en el contexto de las profundas transformaciones de las relaciones Estado-sociedad que vive el país. Estas transformaciones —en el caso del sector agua— implican un doble proceso: por un lado, a su vez con 2 aspectos, *a*) la centralización de la autoridad normativa y regulatoria en una instancia de nivel federal y *b*) la creciente descentralización y desconcentración de la estructura federal encargada del recurso. Por el otro lado tenemos el intento de creación y liberalización de mercados de agua para gestionar la distribución más eficiente del recurso. En relación al primer punto, se trata de la transferencia de las funciones de planeación, programación, construcción y operación del recurso, de la infraestructura y de los servicios a instancias regionales y estatales, mientras que la estructura federal central se transforma en una instancia de regulación y normatividad del sector. Con respecto al segundo aspecto, se trata como dijimos de la constitución de mercados de agua y de la consecuente transformación del usuario del agua en cliente que debe comprar el agua ya convertida en un servicio comercial cuyo costo debe pagar integralmente.

más de 12% de la gente que ahí habita no tiene acceso al agua potable. Las ciudades más grandes de la zona, como las estadounidenses Albuquerque, Las Cruces y El Paso y Ciudad Juárez en el lado mexicano están alcanzando los límites de disponibilidad de agua subterránea, y se estima que en 20 años se habrá acabado con este recurso. Dichas ciudades, de hecho, ya están contemplando satisfacer sus demandas futuras de agua a costa de la agricultura de irrigación, lo cual permite prever la emergencia de importantes conflictos con los usuarios agrícolas. Nada más en el valle de Texas de la baja cuenca del río Bravo se localiza una industria agrícola de riego multimillonaria que depende de dos presas que se alimentan fundamentalmente del agua que llueve en el norte de México.

En este sentido, entre otros cambios introducidos en la legislación del agua se incluye la creación de la figura jurídica de la concesión, que posibilita la conformación de nuevas formas de “usuarios” con capacidad de usufructo privado del recurso. Estos cambios intentan crear las condiciones para transformar el estatus del agua de bien público a bien económico y privado, cuya gobernabilidad se sustente en el funcionamiento de las leyes del mercado. En el proceso, también se intenta transformar el carácter del usuario en tanto que derechohabiente del agua. En relación con esto, desde la Constitución de 1917 el derecho al agua —al igual que a la tierra— era ejercido por los ciudadanos individuales o colectivos (por ejemplo, los ejidos) en función de su relación con el Estado: el agua y la tierra eran propiedad de la nación y el estado concedía el usufructo de los mismos a los usuarios en la forma de un derecho constitucional. Precisamente las reformas al Artículo 27 constitucional y su reglamentación a través de la nueva Ley de Aguas Nacionales buscan transformar esta relación entre el Estado y el derechohabiente mediante la redefinición de los derechos y responsabilidades de los usuarios.²

Otra consecuencia significativa de los procesos que acabamos de describir es la reformulación de las formas de participación ciudadana, en el marco de una reestructuración general del sistema de gobernabilidad del agua. Dicha reestructuración ha tenido como modelo la teoría de la gobernabilidad democrática que postula la existencia de una articulación de tres estructuras: *a)* el Estado, organizado a partir del principio del orden jerárquico-burocrático, *b)* el mercado, organizado a partir de la actividad autónoma de agentes individuales operando en un marco de libre competencia, y *c)* la sociedad civil, organizada a partir de los principios de la participación voluntaria, la solidaridad y la reciprocidad.³ En relación al ámbito estatal, la reforma institucional antes descrita busca transformar la estructura de la gobernabilidad del agua mediante la centralización de la autoridad normativa y regulatoria en un organismo al que se le otorga nivel de *quasi-secretaría de Estado*, a saber, la Comisión Nacional del Agua (CNA). Simultáneamente, y como parte del mismo proceso de reforma, la descentralización y desconcentración del manejo de los sistemas que se transfiere a organismos regionales y estatales y, en particular para el caso al que nos referimos en este artículo, mediante la creación de Consejos de Cuenca. En relación al ámbito de las

² Por ejemplo, hasta mediados de la década de los noventa, se asumía que el costo del servicio debía ser cubierto principalmente a través de una donación político-impositiva del Estado; con las reformas se intenta que el costo del servicio refleje los costos reales y permita la autosuficiencia de los sistemas, a la vez que sea enteramente cubierto por el usuario.

³ Piccioto (1997). Otros autores también sugieren la existencia de una cuarta estructura en la gobernabilidad de los sistemas sociales modernos: el orden de los intereses corporativos, que se distinguiría claramente de los otros tres y tendría una importancia por lo menos equivalente (Streeck y Schmitter, 1985).

relaciones de mercado, se intentan introducir mecanismos como la creación de derechos privados de agua y de mercados para promover el libre intercambio de dichos derechos entre los agentes económicos con el objetivo de introducir mayor eficiencia en el uso del recurso. Finalmente, en lo referente a la sociedad civil, se promueve un mayor involucramiento de los usuarios en los procesos de gestión del recurso y de la infraestructura hidráulica.

En el caso particular que nos ocupa, el espacio de la gobernabilidad se torna aún más complejo debido a que la cuenca del río Bravo-Grande es compartida con los Estados Unidos de América, lo cual implica que la instancia estatal está sobredeterminada por la existencia de acuerdos e instituciones binacionales involucradas en la gestión de la misma. De igual forma, en relación a la esfera de la sociedad civil, se registra una presencia activa de organizaciones no gubernamentales, nacionales y binacionales preocupadas por el saneamiento y sustentabilidad de la cuenca. En efecto, existe un número significativo y creciente de actores organizados y también espontáneos preocupados por la cuenca, con acciones en marcha y con propuestas de solución. Un aspecto interesante de la intervención de estos actores es que sus actividades se orientan a problemas que tradicionalmente eran considerados parte del ámbito de responsabilidad estatal y que en algunas esferas ha ido transformándose a través de diversos procesos en un espacio crecientemente organizado a partir de las leyes del mercado. Es precisamente en esta coyuntura que se detecta el recrudecimiento y la emergencia de conflictos en torno al agua, a punto tal que incluso algunas organizaciones de la “sociedad civil”, teóricamente organizadas a partir de principios de solidaridad y reciprocidad, terminan por convertirse en agentes de intereses sociales particulares y por ende en abierta contradicción mutua, aunque en un nivel más general todas estas organizaciones continúan compartiendo el terreno común de la lucha por la conservación del medio ambiente y la sustentabilidad en la cuenca.

Un factor crucial que afecta directamente las posibilidades de establecer un sistema de gobernabilidad sustentable en la cuenca concierne las condiciones climáticas de la región. En particular, la reciente sequía sin precedentes que ha venido afectando la región desde comienzos de la década de 1990, ha exacerbado las dificultades y se ha convertido en una preocupación central para ambos países. Entre otros problemas, como veremos más adelante, la sequía ha determinado el incumplimiento por parte de México de los acuerdos binacionales firmados desde 1944 para las cuencas de los ríos Colorado y Bravo-Grande.⁴

⁴ En esta región, los recursos hídricos, y el medio ambiente en general, han sido fuertemente deteriorados como consecuencia de un proceso de largo plazo caracterizado por políticas de desarrollo insostenibles y de una gestión inadecuada de los recursos naturales, a lo que se suman los efectos irreversibles del cambio climático. Ya a finales de los años ochenta, algunas estimaciones preveían una reducción en la disponibilidad de agua de 76% en el río Bravo-Grande y de 40%

También, a pesar de que el fenómeno se ha convertido en una preocupación central para los actores involucrados (autoridades, usuarios y población en general), en la práctica los problemas operativos inherentes a la creación del Consejo de Cuenca regional han obstaculizado la implementación de una institucionalidad que facilite la gobernabilidad efectiva y equitativa de la cuenca.

En este trabajo intentamos abordar algunos de los aspectos más destacados de estos procesos que e introducen nuevos y complejos desafíos en los procesos de gobernabilidad en la gestión de la cuenca del río Bravo-Grande. Para lograr nuestro objetivo hemos dividido nuestra exposición en tres apartados y una breve sección de conclusiones. El primer apartado concierne las transformaciones institucionales que se han llevado a cabo en el ámbito de la gestión del agua, donde asumimos que el modelo de gestión a nivel de cuenca constituye una respuesta a la crisis de gobernabilidad del recurso. En el segundo apartado presentamos un análisis de la situación en la cuenca del río Bravo-Grande, con especial énfasis en la creación de los espacios institucionales y sociales de la participación en la gestión de la cuenca; en particular, prestamos atención a lo que consideramos es un nuevo ámbito de construcción de la ciudadanía, que se expresa entre otras formas en la constitución de organizaciones sociales civiles y gubernamentales en torno al problema de la gobernabilidad del agua en la cuenca. El tercer apartado considera la dimensión internacional del proceso, y finalmente ofrecemos algunas conclusiones. En resumen, el trabajo aborda primero el doble proceso de centralización de la autoridad normativa y regulatoria y de descentralización de la gestión operativa del agua en su dimensión nacional, para posteriormente analizar la forma que asumen dichos cambios en el ámbito más acotado y específico de la cuenca del río Bravo-Grande. Completamos este análisis con un tratamiento de la creciente complejidad que caracteriza la gestión integral del agua en la región como resultado de la necesidad de consolidar la participación de los diversos actores involucrados, quienes deben enfrentar el desafío de compartir la gestión de un mismo territorio hidrológico en un contexto de gobernabilidad determinado por el carácter binacional de la cuenca.

Ahora bien, con el objeto de dar la mayor precisión posible a nuestro análisis nos planteamos una serie de preguntas: ¿Qué tanto se ha logrado cumplir con el objetivo de promover una participación ampliada en el caso de la cuenca del río Bravo-Grande? ¿En qué medida se trata más de un proyecto en marcha que de un logro verificable en los hechos? ¿Qué es lo que objetivamente se consti-

en la cuenca alta del río Colorado. La prolongada sequía que afecta la región desde 1992 ha impactado no sólo a las principales ciudades fronterizas y a las zonas agrícolas sino también la propia relación internacional entre México y Estados Unidos (Revelle y Waggoner, citado en Székely, 1993, nota de pie núm. 11, p. 400).

tuye con la ampliación de los espacios de participación en la gestión integrada de la cuenca del río Bravo-Grande? En el desarrollo de este trabajo trataremos de aportar algunas respuestas a estas preguntas.

LAS TRANSFORMACIONES INSTITUCIONALES EN LA GESTIÓN DEL AGUA: EL MODELO DE CUENCA COMO RESPUESTA A LA CRISIS DE GOBERNABILIDAD

Una de las principales ventajas de la gestión del agua en México es haber logrado consolidar, a lo largo de los años, una autonomía técnica, administrativa y de gestión al margen de los intereses sectoriales (Dourojeanni, 2002; Solanes, 2000). Esto no siempre fue así. Haciendo un breve recuento de la historia institucional del sector hidráulico en México, podemos señalar que ésta se remonta a 1926 con la creación de la Comisión Nacional de Irrigación, que es sustituida en 1946 por la Secretaría de Recursos Hidráulicos responsable de los diferentes aspectos del recurso.⁵ En 1976 se crea la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, fusionando a ambas secretarías en una sola. Es hasta 1989 con la creación de la CNA que se logra que la administración del agua tenga una organización propia, reconociendo que la autoridad del agua en México debe ser una autoridad no sectorial y especializada en la gestión de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, por encima de intereses sectoriales y de las visiones parciales. En un primer momento, la CNA nace como órgano desconcentrado de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, pero en 1994 se constituye en un órgano desconcentrado de la recién creada Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca⁶ (Dourojeanni, 2002; CNA, 2003).

Ahora bien, esta trayectoria institucional no refleja la profunda transformación en las funciones que ésta implicó, en particular la conformación de la compleja red institucional de carácter federal, estatal y municipal que requirió la implementación de las políticas de centralización de la normatividad y de la regulación y de descentralización de las actividades de administración, construcción, operación, conservación, construcción de infraestructura y prestación de servicios. Es decir, se pasó de una organización fuertemente orientada a la construcción y operación directa de grandes obras, a otra cuya función predominante es de carácter normativo en materia de administración del agua, así como de apoyo técnico especializado a las autoridades locales para que éstas ejecuten las

⁵ Su responsabilidad era la dirección, organización, control y aprovechamiento del recurso y la construcción de obras de riego, drenaje, agua potable y control de inundaciones.

⁶ Esta se transforma en el 2000 en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

acciones de tipo operativo, y construcción y operación de infraestructura estratégica (CNA, 1989, 1998, 2000^a y 2001).⁷

La estructura federal de la CNA tenía un fuerte asiento en las gerencias estatales, a punto tal que en algunos lugares del país el gerente estatal tenía un poder equivalente al del gobernador del estado. Lo mismo sucedía, aunque con un peso menor, en el caso de los ingenieros en jefe de los distritos de riego. Con la reestructuración de las funciones y el proceso de descentralización y desconcentración de las mismas, la CNA fue reorganizada y se produjo una redefinición de la importancia relativa de las distintas instancias territoriales, como se muestra a continuación:

- Las oficinas centrales de la CNA mantienen las funciones normativas, realizan la planeación estratégica del sector hídrico e intervienen en proyectos de alcance interregional o en aquellos que por su complejidad rebasen el ámbito de las capacidades instaladas en las regiones.
- Se crean trece Gerencias Regionales que son las encargadas de atender los asuntos de competencia federal en el ámbito de sus respectivos territorios. En este esquema, las Gerencias Regionales organizan y coordinan la gestión del agua, tomando en cuenta la naturaleza regional del recurso, ya sea por cuenca o por acuífero. Aunque el grado de consolidación técnica y administrativa entre las regiones es variable, paulatinamente, las gerencias Regionales han ido incorporando las tareas, funciones y facultades que anteriormente eran realizadas desde el nivel central de la CNA.
- Se mantienen las Gerencias Estatales pero con una redefinición y reducción de sus funciones, y quedan dependientes de la Gerencia Regional respectiva. Las mismas trabajan en contacto directo con los usuarios, conocen en mayor detalle los problemas locales y son el enlace con las autoridades estatales y municipales, así como con los representantes de los diferentes sectores de la sociedad.
- La CNA transfiere a los gobiernos estatales y municipales y a usuarios organizados un conjunto de funciones que no involucran actos de autoridad, tales como programas y recursos que anteriormente eran ejercidos o ejecutados de manera centralizada. Entre otros ejemplos puede mencionarse la transferencia gradual a las autoridades locales y a los usuarios organizados de la responsabilidad de construcción y operación de la infraestructura hidráulica, como en el caso de la transferencia de distritos riego iniciada en 1989.

⁷ La magnitud de esta transformación institucional trasciende el alcance de este trabajo, pero baste señalar aquí que la identidad de la institución respondía a su función de operadora y constructora de las grandes obras de infraestructura para la agricultura y los servicios urbanos, y que construir la nueva identidad requerida para las nuevas funciones es una tarea en proceso que aún no acaba de concluirse.

En relación con los servicios municipales, a principios de los ochenta se inició la transferencia de la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento y en 1993 se inició la concesión a empresas privadas de la prestación de este servicio. Se procede además a entregar al sector eléctrico la operación de aquellas presas donde la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha instalado plantas generadoras hidroeléctricas.

- Por último, se transfiere a los gobiernos estatales la promulgación de leyes de agua en las entidades federativas, la creación de las comisiones estatales de agua (CEA) u organismos equivalentes como organismos públicos descentralizados de los gobiernos de los estados, con el objetivo de que estos nuevos organismos asuman responsabilidades que siguen estando a cargo de la CNA (Dourojeanni, 2002, pp. 50-51).

Es en este contexto de reestructuración institucional y de acuerdo a la Ley de Aguas Nacionales de 1992 que se crean en México los Consejos de Cuenca,⁸ con la intención de incentivar y facilitar la actividad coordinada de los tres niveles de gobierno relevantes, federal, estatal y municipal, con los grupos de usuarios acreditados y con diversas organizaciones de la sociedad, universidades, ONG's y usuarios en general, entre otros. Es decir, los consejos surgen como instancias colegiadas que deben promover la participación de los usuarios y de la sociedad

⁸ En México hubo varios intentos por reordenar la gestión del agua a partir del concepto de cuenca. El primero se dio en los años cuarenta, cuando a través de la Secretaría de Recursos Hidráulicos se impulsaron alrededor de nueve Comisiones Ejecutivas, entre otras las de los ríos Balsas, Pánuco y Lerma. Sin embargo, en este periodo los intereses en materia de agua se orientaban a la creación de infraestructura agrícola en el país dado que la prioridad era la producción masiva de alimentos y consecuentemente las comisiones tuvieron una fuerte orientación hacia el desarrollo del aprovechamiento de fuentes de agua para la producción agrícola. Es importante destacar que las comisiones operaban por encima de las instancias estatales y llegaron a tener gran influencia que despertó fuertes reacciones durante los años cincuenta, lo cual condujo a su desaparición y, por consiguiente, a la pérdida de influencia del modelo de cuenca para la gestión del recurso. Posteriormente, entre 1975 y 1980 se retomó el enfoque de cuenca y se hicieron profundos estudios de los recursos hidráulicos del país a partir de dicho modelo. Precisamente, en los estudios del Plan Nacional Hidráulico de 1975 se encuentra el origen de los Consejos de Cuenca que recién se instalan en la década de los años noventa. En algunas regiones, como es el caso de la cuenca del río Lerma, el enfoque de cuenca había comenzado a utilizarse nuevamente a comienzos de los años setenta, con el resultado de que se constituyera la Comisión del Río Lerma. Ya en los años ochenta se creó una comisión intergubernamental para esta cuenca, que tuvo la forma de Consejo Consultivo, y que en 1993 se transformaría en el primer Consejo de Cuenca del país (CNA, 2003).

Cabe destacar que la Ley de Aguas Nacionales (1992) incorpora el concepto de Consejos de Cuenca pero al mismo tiempo otorga un papel central en los mismos al gabinete federal, con lo cual se limitó significativamente su capacidad para operar como organismos realmente descentralizados y autónomos.

en general en los procesos inherentes a la gobernabilidad del agua (Chávez, 2002, p. 52).⁹ De esta forma, el primer Consejo de Cuenca se crea el 28 de enero de 1993, en la región Lerma Chapala, seguido por el Valle de México en 1995, y entre 1997 y 2002 se crean el resto de los 25 Consejos de Cuenca que operan actualmente en el país.¹⁰

LA GESTIÓN DE CUENCA, ¿UNA RESPUESTA A LA CRISIS DE GOBERNABILIDAD?

Los Consejos de Cuenca son instituciones creadas por el Estado mexicano con el fin de lograr un manejo integral del agua por unidad hidrológica a nivel cuenca.¹¹ Desde esta perspectiva los Consejos de Cuenca surgen como respuesta a la

⁹ En efecto, según el artículo 13 de la Ley de Aguas Nacionales, los Consejos de Cuenca son instituidos como las instancias de coordinación y concertación entre la CNA, las dependencias y entidades de los gobiernos federal, estatal o municipal y los representantes de los usuarios de la cuenca respectiva, con el objeto de 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 (CNA: 1994, p. 15).

¹⁰ Para coordinar la creación, operación y consolidación de los Consejos de Cuenca, en 1997 la CNA creó dentro de su estructura orgánica la Coordinación de Consejos de Cuenca (CCC), dependiente de la Unidad de Programas Rurales y Participación Social (UPRPS). La CCC realiza una labor importante de promoción, facilitación, apoyo, coordinación y consolidación de los Consejos. De esta manera se busca asegurar que éstos se constituyan de manera homogénea, respetando las diferencias que determinen las características físicas, socioeconómicas, políticas y financieras de sus cuencas respectivas, así como la problemática de los recursos hídricos en cada caso (México/Semarnap, 1997).

¹¹ En realidad, la gestión integral del agua es un reto que se enfrenta a nivel internacional y que requiere la armonización de los intereses y de la dinámica de las poblaciones con las condiciones y dinámica propias del medioambiente, en particular con relación a las cuencas hidrográficas y al ciclo hidrológico. Esto significa que el proceso de toma de decisiones requiere tanto del conocimiento de las características del comportamiento humano como de las características del medioambiente circundante (Dourojeanni, 2001, p. 7). Ahora bien, en este sentido, cada Consejo de Cuenca es la expresión única —o así debía serlo— de una forma social con características propias en función de las identidades de los actores sociales e institucionales que lo constituyen. Es decir, cada unidad hidrológica se encuentra en constante interrelación con la población que produce y se reproduce en ese territorio y constituye una unidad única, diferenciada de la totalidad territorial más amplia a la que pertenece, como es la nacional. Por supuesto, la complejidad del fenómeno aumenta significativamente cuando dicha territorialidad más amplia incluye más de un Estado-nación, que es precisamente el caso en la cuenca que nos ocupa en este trabajo. Por supuesto, el proceso de descentralización está estrechamente relacionado con esta dinámica, de modo que la dinámica institucional del mismo puede corresponderse con la demanda desde abajo por el acceso a una mayor autonomía en la gestión de los recursos que constituyen la base material de la reproducción de una determinada población en un territorio material específico, demanda que también se orienta a obtener una mayor participación en la toma de decisiones.

necesidad de crear capacidades de gobernabilidad sobre espacios delimitados por razones naturales, como lo es la cuenca hidrológica, que no coinciden con las formas tradicionales de gobierno instaladas sobre límites políticos-administrativos, como es el caso de estados, provincias, regiones y municipios. Así, puede decirse que se pretende evolucionar de golpe del uso del concepto de cuenca estrictamente como *unidad hidrológica* a otro que la concibe como base de participación de sus habitantes y de la gobernabilidad intermunicipal; como base de ordenamiento de uso territorial y de la gestión y conservación de los recursos naturales; como base de programas de control de sequías, inundaciones y deslizamientos y en la aplicación de programas de saneamiento y descontaminación del agua; como base en el manejo y preservación de ecosistemas; como base de programas de manejo agro-silvo-pastoril y de control de erosión de suelos; como base de información, e incluso de integración de zonas de frontera (Dourojeanni, 2002, p. 28).

Evidentemente, la construcción de los espacios de gestión de cuenca constituye un complejo proceso político, institucional y social que apenas comienza en la mayor parte del país. En la primera etapa de la creación de los consejos, el balance en la participación de los representantes gubernamentales de los tres niveles de gobierno y de los usuarios era totalmente desproporcionada, pues en el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales se otorgaba un nivel de participación mucho más significativo a los representantes gubernamentales del más alto nivel político que a los propios usuarios de agua.¹² Sin embargo, esta desproporción en el proceso de participación ocasionaba problemas que llevaron a modificar el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales en diciembre de 1997. En esta oportunidad se redujo el número de participantes gubernamentales y se amplió significativamente la presencia de los usuarios, quienes pasaron a tener por lo menos un número equivalente de representantes. Con estos cambios se estableció un mejor balance en la integración de los Consejos de Cuenca, se les dio mayor operatividad y se otorgaron mayores capacidades a los usuarios para tomar decisiones, con el objetivo de cumplir con la estrategia de descentralización de funciones y de ampliar la participación (Dourojeanni, 2002, p. 54).

Estas modificaciones estuvieron orientadas a crear capacidades de gobernabilidad para la gestión del agua. El gobierno mexicano enfrentaba un doble desafío, por un lado se trataba de encontrar los instrumentos de ley y las formas organizativas que fueran capaces de prevenir, enfrentar y solucionar los crecientes conflictos por el uso del agua, los cuales se han incrementado significativa-

¹² Utilizamos aquí el término “usuarios” en los términos definidos por la Coordinación de Consejos de Cuenca de la CNA para la organización de dichos consejos en el país, es decir, todos aquellos que tienen una concesión de derecho de agua, véase nota 15 (Reunión del grupo Prinsw-México con integrantes de la Coordinación de Consejos de Cuenca).

mente en el país. Por otro lado, el proceso debía ser liderado y conducido por la propia CNA, a pesar de que la misma comparte con el resto de la estructura estatal tradicional una cultura política fuertemente corporativizada, centralizada y vertical, que contrasta notoriamente con la cultura participativa que se busca promover. Comprensiblemente, los debates en torno a la modificación del Reglamento de la ley expresan con mucha claridad las transformaciones, y los límites, de la concepción de participación en la gestión de cuenca. En particular, como veremos más adelante, la modificación del reglamento define con mayor claridad el carácter del usuario, con lo cual se fortaleció teóricamente la capacidad de participación de la población en los Consejos.

Estas transformaciones que hemos señalado en el plano político-institucional suponen otra forma de entender la participación ciudadana en torno al tema del agua. Esto es así porque ahora se requiere a las distintas instancias estatales que interactúen con los actores locales, cuya misma identidad social y política está estrechamente entrelazada con el medio ambiente al que pertenecen y que van cobrando una autonomía creciente y preactiva en relación con la gestión de los recursos naturales. No obstante, y en contradicción con lo anterior, en el caso específico del debate acerca de los usos integrales del agua, el proceso participativo requiere además que estos actores estén debidamente informados y sean conscientes de la complejidad que caracteriza la gestión de este recurso, lo cual no siempre se cumple.¹³

A pesar de estas limitaciones y contradicciones, el modelo antes descrito ha servido para la elaboración de una serie de iniciativas que se orientan a lograr una mayor participación de los usuarios del agua en el debate acerca de la gestión del recurso, especialmente en relación a las dimensiones económica y finan-

¹³ Precisamente, entre los motivos enumerados para explicar el retardo en la implementación de la gestión integrada del agua figura prominentemente el desconocimiento por parte de los usuarios de los problemas que afectan la gestión del agua, a lo que se suma un grado importante de ingenuidad y fatalismo que frecuentemente impide el debate racional. Se suma además una ignorancia frecuente por parte de estos sectores acerca de los derechos y obligaciones de la comunidad en relación con el agua, e incluso se registra un desconocimiento básico acerca de quiénes son las autoridades y las empresas a cargo de la gestión del recurso. Es decir, la participación de los usuarios se ve gravemente afectada por el desconocimiento no tan sólo de los procesos hidrológicos e hídricos, sino también de la dimensión operativa, es decir, de las leyes, instituciones, responsabilidades, programas y proyectos en ejecución, los efectos de los mismos sobre la salud de la población, sobre el medio ambiente, sobre la producción y, notablemente, sobre las condiciones generales que afectan a los asentamientos humanos ubicados en zonas vulnerables (Dourojeanni, 2001, p. 41). Un problema adicional concierne a las limitaciones de los procesos de descentralización en un contexto de alta rotación de los funcionarios públicos que impide la acumulación de conocimiento para futuras gestiones, ya que el proceso descentralizador se ha implementado sin haber logrado constituir simultáneamente una institucionalidad que permita compensar por esta carencia.

ciera. Por otra parte, continúan aflorando cada vez más las llamadas iniciativas de manejo de cuencas, que persiguen una mayor armonía y coordinación entre las actividades del gobierno y la comunidad local. En consecuencia, esta noción de participación intenta involucrar la mayor cantidad y variedad de actores para que colaboren y participen efectivamente en el manejo integrado de cuencas, tanto en el aspecto socio-territorial (por ejemplo, en la adopción de prácticas adecuadas para la gestión de ordenación del uso del territorio) como en el administrativo-institucional (por ejemplo en la implementación de instrumentos de mercado y/o comerciales para gestionar el pago de cuotas, etc.). Como esta promoción de una participación ampliada es teóricamente compatible con las corrientes descentralizadoras de actividades de lo federal a lo regional y municipal, las políticas de descentralización constituyen un factor importante en la búsqueda de una nueva forma de gestión del agua, de las cuencas, y del medioambiente en general (Dourojeanni, 2001, p. 40).

En este sentido, el caso particular del Consejo de Cuenca del Río Bravo-Grande nos ilustra cómo se ha dado este proceso en la práctica. Tras un primer intento de formar el Consejo de Cuenca en esta región en 1993 (que sólo culminó en la firma de un convenio de intención entre el nivel federal y los estados interesados), la creación formal del mismo no se pudo concretar hasta el 21 de enero de 1999.

El Consejo de Cuenca del Río Bravo-Grande (figura 1)

Con el objetivo de consolidar y fortalecer la participación de la sociedad en torno a la resolución de los problemas de la cuenca, y en particular los conflictos generados por los mismos, se constituyó en 1994 el Consejo de Cuenca del Río Bravo-Grande, el cual según la Ley de Aguas Nacionales, es una instancia de coordinación y concertación entre las dependencias y entidades federales, estatales y municipales y los representantes de los usuarios del agua, con el objeto de 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.¹⁴

¹⁴ En este artículo no proporcionaremos una descripción de la cuenca del río Bravo-Grande, ya que este tema será abordado con detalle en otros artículos del libro. Sin embargo, es importante señalar que esta cuenca tiene las siguientes características: 457 275 km² de superficie total, de los cuales un total de 226 275 km² corresponden a México, y abarca partes o la totalidad de los estados de Coahuila, Durango, Chihuahua, Tamaulipas y Monterrey. La cuenca tiene más de 9 millones de habitantes en la parte mexicana; la ciudad de Monterrey es el centro urbano más importante de la región. Por otra parte cuenta con dos presas internacionales, Falcón y La Amistad y tiene dos afluentes importantes, a saber los ríos Conchos y Salado, dos tercios de cuyo caudal corresponden a México. Por el lado de Estados Unidos, la cuenca se extiende a través de los estados de Colorado, Nuevo México y Texas (véase figura 2).

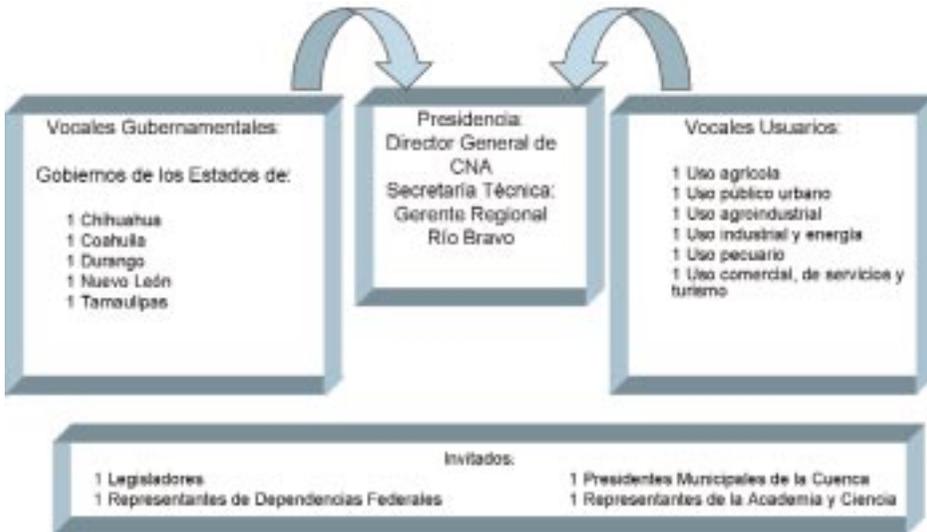


FIGURA 1. Composición del Consejo de la Cuenca del Río Bravo.

El Consejo se integra con cuatro sectores principales: a) la Comisión Nacional del Agua, b) los gobiernos de los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León y Tamaulipas, c) los representantes de los sectores de usuarios,¹⁵ y d) invitados de grupos representativos de la sociedad y de organismos públicos y privados. A su vez, el Consejo de Cuenca cuenta con dos organizaciones auxiliares, la Comisión de Cuenca del Río Conchos y la Comisión de Cuenca del Río San Juan y un grupo que se ocupa de su seguimiento y evaluación.¹⁶

De esta manera, con la instalación del Consejo de Cuenca del Río Bravo-Grande se intenta crear un foro permanente de análisis, diagnóstico y propuesta de soluciones a los problemas del agua en la región que fortalezca el proceso de planeación y programación hidráulica. También pretende que la gestión y mane-

¹⁵ Como se dijo previamente, la definición de “usuario” empleada aquí es la utilizada por la CNA y corresponde a la terminología de Ley de Aguas, que corresponde en cierto sentido a una conceptualización limitante, pues la misma sólo incluye a aquellos usuarios que tienen el carácter de persona moral, es decir, que cumplen las condiciones para ser concesionarios del agua, lo que los habilita para recibir el agua en bloque de la CNA. Ahora bien, en la legislación de nivel estatal, el concepto de “usuario” incluye también a las personas físicas que utilizan los servicios de agua y alcantarillado. Esta discrepancia en la definición de “usuario” en la legislación vigente puede presentar inconvenientes para la consolidación de una participación ciudadana activa en torno al manejo integral del agua por cuencas, como se verá más adelante.

¹⁶ CNA, Consejo de Cuenca del Río Bravo, *op. cit.*, p. 13.



FIGURA 2. Mapa de la cuenca del río Bravo.

jo de los recursos hídricos sea integral y financieramente autosustentable y consolidar la participación y corresponsabilidad social con condiciones para el logro del desarrollo sustentable.¹⁷

Esto es así porque, desde la perspectiva del Consejo de Cuenca, la nueva política hidráulica demanda un cambio de cultura tanto a nivel institucional como a nivel de los usuarios y de la sociedad. Una transformación que va de una cultura de recepción de servicios a una gestión de los mismos, e implica una redistribución de responsabilidades y de adecuación del papel que cumplen los distintos usuarios en la gestión integral del agua, así como en la administración, operación y financiamiento de infraestructura hidráulica y sus servicios inherentes.¹⁸

A pesar de estos objetivos y del hecho de que el Consejo de Cuenca fue creado en 1994, el mismo no sesionó regularmente sino hasta el año 2000, cuando los gobernadores de Tamaulipas y Chihuahua solicitaron que se comenzara con los trabajos acordados por el Consejo, lo cual todavía demoró largamente debido a los acuciantes problemas derivados de la sequía prolongada que padece la zona desde 1993.¹⁹ Al año siguiente, en junio de 2001, el Consejo decidió la constitución de un grupo especializado de trabajo para analizar la situación y construir una reglamentación de la distribución de aguas al interior de la cuenca en el lado mexicano, con el objeto de enfrentar con equidad el problema de la escasez del agua producto de la sequía. Esto permitió establecer un consenso acerca de los criterios generales de la distribución del agua al interior de los estados comprometidos en la cuenca.

Ahora bien, dado que 78% del agua utilizada en esta cuenca es para uso agrícola y que debido a la sequía la reducción del volumen promedio de entrada a las presas ha alcanzado 52%, los acuerdos tomados por el Consejo desde el año

¹⁷ Esto es así dado que los lineamientos generales empleados para el análisis de proyectos tiene que ver con: 1) gestión integral, 2) equidad entre usuarios, 3) uso eficiente del agua, y 4) sustentabilidad hídrica. Por lo tanto, los objetivos específicos que se plantea el Consejo de Cuenca son: a) formular y ejecutar programas y acciones para el mejor ordenamiento y regulación de la distribución y aprovechamiento de las aguas subterráneas y superficiales, b) fomentar el cuidado y el saneamiento de las aguas de la cuenca y la vigilancia y control de su calidad, c) promover el uso eficiente de las aguas subterráneas y superficiales de la cuenca y de su infraestructura, alentando la ejecución de programas para su mejor aprovechamiento y la reutilización de las aguas residuales, d) conservar los cuerpos de agua y las corrientes dentro de la cuenca y e) promover el reconocimiento del valor ambiental, social y económico del agua y el aprovechamiento y uso sustentable de los recursos naturales de la cuenca.

¹⁸ CNA, Consejo de Cuenca, *op. cit.*, p. 15.

¹⁹ Mientras que el promedio de precipitación anual histórico en la cuenca desde los años setenta hasta 1992 fue de 1 681 mm³, dicho volumen se redujo a 492 mm³ entre 1993 y 2001, por lo cual aunque la región ha sido caracterizada históricamente por sequías recurrentes la situación actual constituye un cambio cuantitativo y cualitativo de enorme envergadura.

2000 han tenido como eje prioritario la recuperación de los volúmenes en los distritos de riego (con especial énfasis en los del río Conchos) por medio de:

- Reconversión de cultivos
- Tecnificación del riego
- Reordenamiento productivo
- Desincorporación en los distritos de riego de la superficie que haya cambiado el uso del suelo, que esté ensalitrada, abandonada, que sea de baja productividad o que tenga problemas de infraestructura hidroagrícola
- Modificación de las concesiones en función del volumen ahorrado
- Revisión de las políticas de operación de las presas
- Revisión de los criterios de distribución de agua entre los diferentes usuarios
- Reglamentación de la distribución interna del río Bravo-Grande

Como dijimos previamente, la composición del Consejo está integrada por una diversidad de actores, que incluyen directivos de la CNA, los gobernadores de los Estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León y Tamaulipas y representantes de los distintos usuarios. Aunque por una parte dicha composición sugiere que existe una búsqueda de consenso en relación con la gestión de la cuenca, el proceso se ve obstaculizado debido a las contradicciones entre intereses particulares antagónicos presentes al interior del Consejo de Cuenca. Los gobernadores, por ejemplo, procuran constantemente beneficiar a sus propios estados en la asignación del uso de las aguas de las distintas represas, con lo cual responden a las demandas de la población y a la presión de intereses locales, todo lo cual incide en decisiones específicas tales como el cierre o la apertura de una determinada presa o represa, que a su vez puede agravar las condiciones de sequía en otras áreas de la cuenca.

Por otra parte, y con respecto a los usos del agua, existe una elevada competencia entre los distintos usuarios de las entidades que integran la cuenca del río Bravo-Grande. En particular, el hecho que el principal uso del agua en la frontera norte sigue siendo el agrícola permite comprender el agudo debate que tiene lugar entre los distintos usuarios ya que el uso agrícola es notablemente ineficiente con respecto al uso industrial, medido tanto a partir del peso productivo de ambos sectores (el PIB agrícola es notablemente más bajo que el industrial) como tomando en cuenta la competitividad internacional (que es muy baja en el caso del sector agrícola).²⁰ Por lo tanto, no es de extrañar que los conflictos por el recurso no se dan exclusivamente a nivel de los gobernadores, sino también entre el uso urbano y agrícola del recurso y aun entre los propios productores agrícola-

²⁰ Un ejemplo de estos conflictos es el que se lleva a cabo entre los agricultores de los distritos de riego de Tamaulipas y la demanda de agua de la ciudad de Monterrey para uso urbano, que toma la forma de una disputa por el agua de la presa de El Cuchillo.

las de los distintos distritos del norte del país, como Delicias en Chihuahua, bajo río San Juan y bajo río Bravo-Grande en Tamaulipas, así como también en las ciudades de Monterrey y Saltillo, aunque en este caso son menos graves.²¹ Estos conflictos por la distribución del recurso entre los productores agrícolas, se acentúan en épocas de sequía, que como ya señalamos en el caso de esta cuenca se ha constituido en una situación permanente en los últimos años,²² una situación que se agrava aún más porque los agricultores estadounidenses también solicitan su porción del recurso del otro lado de la frontera.²³

Otro aspecto que afecta la búsqueda de una concertación en relación a la gestión integral del agua en la cuenca es el elevado grado de politización que el tema registra con gran frecuencia, a tal punto que el problema es utilizado continuamente con fines electorales. Un ejemplo de ello ha sido el pago del agua por parte de México a Estados Unidos, un tema que los distintos partidos políticos han retomado como bandera política, ya sea para defender el pago o para oponerse al mismo. Inclusive en el lado estadounidense el actual gobernador de Texas también utilizó con éxito el tema del adeudo de agua de México a Estados Unidos como bandera política en su campaña electoral.

Desde otra perspectiva, el impulso dado por el gobierno a la participación de los usuarios y de las diferentes autoridades de las entidades federativas de la cuenca ha sido muy importante, y el Consejo se ha constituido en un foro que no existía anteriormente, a la vez que en su seno se comienzan a gestar importantes

²¹ La actividad agrícola en la actualidad atraviesa por una grave crisis como resultado de las transformaciones registradas en las últimas dos décadas en la política agrícola y agraria del país, con la desaparición de los subsidios al campo, de las empresas estatales de comercialización, crédito, fertilizantes y extensión agrícola, y con la apertura, a fines de los ochenta, del mercado nacional a los productos agrícolas del exterior, lo cual ocasionó la crisis más seria enfrentada por el campo desde la Revolución Mexicana.

²² A modo de ejemplo, sirvan los siguientes reportes de prensa: “Por su parte, Jorge Luis López Martínez, dirigente de los productores agrícolas de la zona norte de la entidad, denunció que en forma ilegal se han extraído del cauce del río Conchos, en Nuevo León, más de mil millones de metros cúbicos de agua para regar las tierras en aquella región, dejando prácticamente sin el vital líquido a miles de hectáreas de cultivos a todo lo largo de la frontera tamaulipeca” *El Universal*, 13 de marzo de 2002. Siguiendo la disputa, “los 14 mil 500 agricultores del distrito 025 afectados por segundo año consecutivo con la cancelación del servicio de agua para el cultivo de sus tierras, aseguraron ser víctimas de una injusticia y acusaron al gobierno de Chihuahua de hacer valer su voluntad apropiándose unilateralmente del vital líquido que baja del río Conchos, para no dejarlo llegar hasta los productores de las zonas del bajo río Bravo”, *El Universal*, 24 de marzo de 2002.

²³ Por ejemplo, “unos 60 agricultores del sur de Texas, con tractores y maquinaria agrícola, protestaron a la entrada del puente internacional Reynosa-Pharr, en demanda de que México pague el agua que se establece en el tratado firmado en 1944 entre ambos países, lo que provocó el cierre del cruce fronterizo por espacio de 45 minutos”, *El Universal*, 24 de marzo de 2002. En efecto, las protestas se acentuaron en contra del gobierno de Chihuahua, a quien acusaron de estar ocultando en sus presas el agua que se adeuda a Estados Unidos.

acuerdos para dirimir los conflictos y controlar el impacto de la sequía. Sin embargo, hay dos grandes problemas que persisten, a saber, la dificultad, como hemos visto antes, de alcanzar una verdadera concertación ya que existen poderosos intereses creados y el hecho de que la misma iniciativa estatal tiende a interferir en el funcionamiento eficiente del Consejo ya que la participación ha sido limitada a organismos estatales y a aquellos usuarios que son reconocidos en el texto de la ley, que son solamente una fracción del conjunto de los usuarios reales.

Otro aspecto importante a considerar, que también preocupa a las autoridades, es el tema de la representación. ¿En qué medida los usuarios que llegan al Consejo representan los intereses del sector del cual provienen? Es importante recordar que si hablamos de los distritos de riego la polarización social y económica que éstos han sufrido es muy grande, y que se registra una tendencia creciente a la concentración de tierras en pocas manos y a la masiva expulsión de medianos y pequeños productores, particularmente aquellos pertenecientes al sector ejidal, al mismo tiempo, se observa una presencia cada vez mayor de grandes rentistas de la tierra que actúan por temporadas o ciclos agrícolas, que no mantienen una ocupación permanente de los predios, y que tampoco siembran la tierra todos los ciclos. En esta perspectiva, corresponde preguntar los intereses de qué productores están representados en Consejos de Cuenca.

En otro ámbito, si nos referimos a los organismos operadores de los servicios de agua y saneamiento en las ciudades de la cuenca, nos encontramos con una gran diversidad institucional, no sólo por su figura jurídica (los mismos pueden ser públicos, sean estatales, municipales o paramunicipales, o pueden ser empresas con participación mixta pública municipal y privada, como es el caso en la ciudad de Saltillo), sino también por su escala, como es el caso en Nuevo León, estado en el que un solo organismo operador de carácter público sirve a toda la entidad y es complementado por una gran cantidad de pequeñas organizaciones municipales. Cabe recordar, dicho sea de paso, que los millones de usuarios del agua que contratan el servicio a los organismos operadores no tienen ninguna representación en el Consejo de Cuenca.²⁴

²⁴ Es importante señalar que el problema de la participación y la representación ciudadanas son muy recientes en México, tanto en la práctica como en el discurso político. En México no existe una cultura previa de participación, y por el contrario el sistema político se ha caracterizado por su carácter vertical y corporativo. Esta es la cultura política en la cual se construyó históricamente la relación entre el Estado y el conjunto de la sociedad, por lo cual no existen marcos de experiencia participativa, y la mayor parte de las iniciativas sociales fueron históricamente cooptadas, excluidas o reprimidas. Por otro lado, los mexicanos tienen una desconfianza generalizada con respecto a los políticos, sean funcionarios públicos o miembros de los partidos políticos, ya que históricamente se han sentido utilizados para fines electorales, lo cual hace muy difícil construir una nueva cultura participativa y, con ello, un sistema de representación real, lo cual será necesariamente un proceso de mediano y largo plazo.

Por otra parte, se ha dado el surgimiento de una diversidad de actores a partir de una toma de conciencia por parte de la ciudadanía acerca de los problemas más críticos que afectan a la cuenca, tales como la contaminación, la pérdida de biodiversidad o los desafíos a la sustentabilidad urbano-ambiental, entre otros. Es en este medio que se han constituido diversas organizaciones que participan activamente en el debate y que han pasado a formar parte del esquema de gobernabilidad real, objetivo, del agua en la cuenca. Sin embargo, a pesar de que estos actores son los que se encuentran más capacitados para participar activamente en el diseño de la normatividad y de las instituciones que puedan permitir el establecimiento de un modelo sustentable de usos del agua, tanto en términos sociales como medioambientales, los mismos no han sido incluidos formalmente en el Consejo de Cuenca.

Por lo tanto, a pesar de los esfuerzos realizados y del logro que representa la constitución de los consejos de cuenca, en la práctica se sigue obstruyendo la participación efectiva de actores clave, lo cual incide negativamente en la posibilidad de construir condiciones de gobernabilidad en la cuenca. No es solamente que estos actores autónomos sean excluidos de las actividades del Consejo de Cuenca, sino que además los mismos son vistos con reticencia y temor por las mismas autoridades encargadas de la formación y reglamentación de dicho organismo, ya que estos actores frecuentemente asumen una postura radical y prefieren mantener su autonomía con respecto a los organismos del Estado. En parte, esta situación responde a las contradicciones surgidas de la cultura política operante, a la que ya hemos hecho referencia, y que evidentemente dificulta el establecimiento de un diálogo entre actores que mantienen una desconfianza mutua. Por otra parte, y aún más crucial, en algunos casos las posiciones de aquellas organizaciones que permanecen excluidas del diálogo formal constituyen una amenaza para los intereses representados en el Consejo,²⁵ tema que trataremos a continuación.

Organizaciones civiles y gubernamentales en la cuenca del río Bravo-Grande

Existe un número importante de organizaciones sociales, académicas, etc., que se han ido creando a lo largo de la historia al margen e incluso en contradicción con el espacio estatal. Estos actores, que forman parte del espacio que concep-

²⁵ El tema de la forma de participación de las organizaciones sociales en los Consejos de Cuenca fue abordado en una entrevista que realizamos con la Gerencia Nacional de Consejos de Cuenca. La respuesta recibida fue que las organizaciones sociales participan en el grupo especializado de trabajo que se ha constituido en el Consejo, en el cual la CNA actúa como mediador y facilitador para su incorporación. Sin embargo, la Gerencia considera que las ONG más importantes de la región han preferido mantenerse como foros protagónicos independientes, que no se han sumado al esfuerzo, que tampoco trabajan con los usuarios, y que asumen una actitud pura y permanentemente crítica pero sin aportar contribuciones que ayuden a solucionar los problemas.

tualizamos como la sociedad civil, han ejercido un papel fundamental en la concientización ciudadana acerca de la necesidad de desarrollar una nueva cultura del agua, y también se han constituido en asesores para la implementación de estrategias políticas en temas tales como la conservación de la biodiversidad y el desarrollo sustentable.

De las organizaciones que hemos estudiado, 60% tiene su sede en Estados Unidos. La mayor parte de las mismas trabajan en programas orientados a la concientización de la población en relación con los problemas del medioambiente y el desarrollo económico sustentable. Un segundo grupo, también centrado en la preservación del medio ambiente, desarrolla actividades más específicas y se aboca al trabajo en comunidades locales, este tipo de trabajo corresponde a una modalidad operativa que se observa con mayor presencia en el lado mexicano. Por otra parte, existe un grupo de instituciones dedicadas a realizar trabajos científicos sobre problemas específicos. Estos son llevados a cabo por especialistas en medioambiente, generalmente científicos universitarios que trabajan en el desarrollo de tecnologías medioambientales para solucionar problemas específicos a nivel de ecosistemas y áreas urbanas de la cuenca. Otro grupo, más reducido en número y que tiene representantes solamente en el lado estadounidense está compuesto por instituciones que se dedican a la asesoría legal y consultorías técnicas para instituciones gubernamentales, por ejemplo en la creación de proyectos de ley para el desarrollo sustentable. Por último, se encuentra un grupo pequeño de instituciones dedicadas al fortalecimiento y expansión de una ciudadanía activa en la cuenca, por ejemplo mediante el apoyo a la autoorganización de las comunidades.

A pesar de la gran diversidad de formas organizativas y de propósitos en torno a los cuales se agrupan, todas las instituciones reconocen que el trabajo de información y asesoramiento a los habitantes de ambos lados del río, constituye un desafío crucial. Esto es así porque la factibilidad de establecer un sistema de gobernabilidad de la cuenca depende de la capacidad de las organizaciones para ayudar a las comunidades locales a restaurar y mantener el medio ambiente, sus economías, y el bienestar social en general, así como también promover la concientización de la población en su conjunto en torno a estos problemas. En este sentido, desde la perspectiva de estas organizaciones, la formación de coaliciones en la frontera es el mejor camino para resolver problemas ambientales internacionales a través del intercambio de relaciones de cooperación.²⁶ Con este

²⁶ Tenemos por ejemplo el caso de la Coalición de la Cuenca del Río Grande-Bravo, formada por más de cincuenta instituciones y organizaciones abocadas a la problemática ambiental de la región. Desde 1994, fecha en que se organizó el primer congreso “Uniendo a la Cuenca” que constituyó el antecedente inmediato de la Coalición creada dos años después, esta organización multinacional y multicultural se ha constituido en un vehículo importante para crear redes de or-

objetivo, las organizaciones intentan generar relaciones más estrechas y un mejor entendimiento de los problemas entre la diversidad de actores de la cuenca, para tal efecto se llevan a cabo una serie de actividades que se difunden entre los interesados por medio de publicaciones, conferencias, encuentros, etcétera.

Es de destacar que, a pesar de la relevancia de su actividad, ninguna de las organizaciones ha tenido contacto con el Consejo, mantienen una posición crítica con respecto al mismo, y reclaman su transformación radical: a la fecha el papel del Consejo es muy pobre ya que no incluye representantes de las disciplinas fundamentales sobre los factores que interactúan en la cuenca (naturales, sociales, económicos). Se necesita un verdadero Consejo de Cuenca para la gestión integral del río Bravo-Grande, que se base en los Consejos de Cuenca Afluente. Para ser realmente representativo de la cuenca debe tener membresía inter y multidisciplinaria, seleccionada por sus conocimientos de las disciplinas cuyos parámetros integran la ecología del ecosistema cuenca, para que las recomendaciones y las decisiones se tomen sobre la base del mejor conocimiento disponible. Generalmente los aspectos sociales y económicos están bien representados, pero la ecología es excluida y no se han integrado especialistas sobre dicho tema. Debe tomarse en cuenta que los usuarios, cuya opinión es fundamental, deben contar con la información de los expertos, quienes a su vez tienen un papel fundamental para hacer evaluaciones informadas.²⁷

En resumen, si bien la creación del Consejo de Cuenca refleja un reconocimiento de que el manejo integral del agua en la región requiere la participación ampliada de los actores involucrados, el proceso confronta una serie de desafíos. En particular, la implementación de la estrategia requerida para el desarrollo y aplicación de la normatividad e institucionalidad necesarias para la gobernabilidad de la cuenca implica procesos de mediano y largo plazo, que demandan un esfuerzo sostenido por parte de todos los actores. Sin embargo, además de los obstáculos antes mencionados, dichos procesos deben superar también las contradicciones derivadas del carácter internacional de la cuenca.

ganizaciones y personas comprometidas con la preservación de la cuenca. Su principal objetivo es el de superar las diferencias con el objeto de asegurar la sobrevivencia de la cuenca en el largo plazo y sostener su integridad, diversidad y vitalidad. La Coalición se ha esforzado por ayudar a las comunidades en tareas de restauración y mantenimiento del medioambiente, y la promoción del desarrollo económico y el bienestar social de toda la cuenca. El organismo celebra congresos bianuales y el llamado Día del Río, una celebración anual que une a los habitantes de la cuenca en el tercer sábado de octubre para la realización de diversos eventos de concientización sobre los problemas de la cuenca. La Coalición también trabaja día a día en acciones de base comunitaria para la capacitación de la población, por ejemplo a través de su Programa de Redes de Computación para grupos comunitarios marginados que son entrenados y se les dota de equipos.

²⁷ Información basada en una encuesta de elaboración propia realizada a organizaciones que realizan sus actividades en la cuenca del río Bravo-Grande, febrero de 2003.

LA DIMENSIÓN INTERNACIONAL DE LA GESTIÓN Y PARTICIPACIÓN DE LA CUENCA

La complejidad de las condiciones de gobernabilidad en la cuenca del río Bravo-Grande se realiza por el carácter internacional de la misma, caracterizada por procesos históricos dramáticos que tuvieron lugar desde mediados del siglo XIX. En este contexto, las condiciones de sequía extrema que afectan la región desde comienzos de los años noventa han exacerbado las contradicciones existentes, por ejemplo, con el incumplimiento por parte de México con el compromiso de entregas de agua a Estados Unidos según lo dispuesto en el Tratado sobre la Utilización de las Aguas de los Ríos Colorado y Tijuana y del Río Grande (3 febrero 1944). Este incumplimiento, como señalamos en páginas anteriores, ha provocando serios conflictos entre distintos usuarios del agua, tanto al interior de México (por ejemplo, entre autoridades municipales, sobre todo en las grandes ciudades, y entre los agricultores) como así también a través de la frontera (por ejemplo, entre usuarios mexicanos y estadounidenses, especialmente los agricultores texanos). En este sentido, la estimación de las pérdidas económicas derivadas de la sequía en Texas entre 1992 y 1995 ascendieron a 5 mil millones de dólares, sin contar los costos económicos asociados con los cambios en los patrones migratorios y laborales así como con los problemas de salud pública que se suscitaron a raíz de la misma (Mumme, 1993, pp. 157-158). Las contradicciones surgidas en torno a la distribución de los recursos hídricos transfronterizos ha llegado a ser tan crítica que la misma ocupa ahora un lugar prioritario en la agenda de discusión de los presidentes de ambos países.²⁸

Según el Tratado de 1944, México deber otorgar 431 millones de metros cúbicos (Mm^3) al año (o 350 000 acres pie por año) a Estados Unidos, durante un ciclo de cinco años consecutivos. En el ciclo 25, que terminaba el 2 de Octubre de 1997, México ya debía $1\,240\ Mm^3$ (1 024 millones de acres-pie), más del doble del déficit acumulado por México en la sequía histórica de los años cincuenta. Al finalizar el ciclo 26, México adeudaba alrededor de $2\,000\ Mm^3$. Ahora bien, uno de los problemas de fondo del Tratado de 1944 es que el mismo carece de una definición conjunta del término “sequía extraordinaria”, empleado en su artículo 4°. Este artículo establece que en casos de sequía extraordinaria o de accidentes serios en los sistemas hidráulicos de los afluentes mexicanos aforados

²⁸ Cabe destacar que los problemas de disponibilidad de agua en la relación México-Estados Unidos no son exclusivos a la cuenca del río Bravo. En la cuenca del río Colorado, por ejemplo, aunque Estados Unidos cumple con los volúmenes de entrega de agua superficial, el problema sustantivo en esa región concierne la reducción en los excedentes de agua y sus efectos en el ecosistema, sobre todo en el delta del río Colorado y su hábitat. En última instancia, y como sucede también en el río Bravo-Grande, tal reducción está asociada a los cambios globales en el clima y a la creciente competencia entre los distintos usuarios por volúmenes de agua cada vez mayores.

que puedan impedir a México la entrega de los 431 Mm³ anuales asignados a Estados Unidos, los faltantes existentes al final del quinquenio correspondiente se repondrán en el ciclo siguiente con agua procedente de los afluentes mexicanos mencionados en el Tratado. Esta indefinición del término ha provocado diversas interpretaciones, incluso algunas contradictorias, sobre cuál es el nivel de agua mínimo necesario para declarar el estado de “sequía extraordinaria”. Por ejemplo, a finales del 2002, los agricultores estadounidenses de la cuenca baja del río Bravo-Grande argumentaban que los flujos de agua a los tributarios mexicanos no han cesado completamente, que los niveles de lluvia se mantuvieron 80% respecto del volumen normal de lluvia para la región y que por tanto debería haberse transferido el agua que se encuentra en las reservas. En cambio, para los agricultores y autoridades mexicanos, incluidos los gobernadores de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, la reducción en el nivel de precipitación sí corresponde a las condiciones de sequía extrema y, según el Tratado, el agua que se encuentra en las presas debe ser utilizada primordialmente para satisfacer las necesidades en la cuenca del río Conchos y sólo una vez cumplido este objetivo se puede transferir agua a Estados Unidos (Kelly, 2001, pp. 24-25).

Otro problema presente en el Tratado de 1944 es la desigualdad respecto de las reglas que distribuyen las aguas en el río Colorado y el río Bravo-Grande en casos de sequía extraordinaria o de accidentes serios en los sistemas hidráulicos. Mientras que en el caso del río Bravo-Grande México está obligado a pagar el adeudo en el quinquenio siguiente, en el caso del río Colorado el tratado establece que el agua asignada a México “se reducirá en la misma proporción en que se reduzcan los consumos en los Estados Unidos”. Esta razón explica que expertos del tema hayan considerado históricamente a este tratado como ventajoso para Estados Unidos, aunque recientemente el gobierno del presidente Vicente Fox haya adoptado la posición contraria de que el acuerdo es ventajoso para México, por el hecho de que nuestro país recibe, anualmente, cuatro veces más agua (1 850 Mm³) del Colorado de la que le da a Estados Unidos el río Bravo-Grande. Además, Estados Unidos controla el agua en la cuenca del río Colorado, por lo que México depende totalmente de esa fuente para abastecer del vital líquido a Baja California y parte de Sonora. En estas circunstancias, según la interpretación del gobierno de Fox, no conviene seguir la vía de la renegociación del Tratado de 1944.

Independientemente de la posición e interpretación adoptadas, debe reconocerse que la disponibilidad global de agua es mucho menor a la existente cuando se firmó el acuerdo, puesto que las condiciones climáticas y demográficas en la región han cambiado radicalmente desde entonces; además, el pronóstico para los próximos cinco años indica que los niveles de precipitación pluvial serán inferiores a la media histórica, agravando así las condiciones de sequía en la región fronteriza y limitando aún más la capacidad del país para cumplir con los compromisos de agua con Estados Unidos.

El manejo integral de las cuencas hidrográficas y la deficiencia institucional

Hoy se reconoce ampliamente, tanto en México como en el mundo entero, que el manejo integral de las cuencas hidrográficas es la estrategia más adecuada para la búsqueda de soluciones a los problemas de escasez y contaminación del agua.²⁹ En otras palabras, un enfoque integral para lograr la sustentabilidad en la gestión del agua que tome a la cuenca como una unidad, y considere la interdependencia no sólo entre los distintos usos del agua (municipal, agrícola, industrial y ambiental), sino también entre los usuarios corriente arriba y corriente abajo de la cuenca, y entre los usos del suelo y del agua. Ya existen varias propuestas que plantean la necesidad de introducir ese nuevo paradigma en el manejo de los recursos hídricos compartidos por México y Estados Unidos, como la única vía para enfrentar los enormes desafíos que imponen el crecimiento demográfico y el cambio climático a la viabilidad económica y social de la zona.³⁰ Sin embargo, hasta ahora continúa predominando un vacío institucional en la coordinación de los esfuerzos realizados por distintas organizaciones para la consecución de tal fin.

Tanto la Semarnat como la Comisión Nacional del Agua (CNA), que es desde 1989 la autoridad federal mexicana encargada de administrar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, son responsables de remediar la sequía en el norte del país. Por su parte, la Comisión Presidencial para la Frontera Norte, presidida por Ernesto Ruffo, ha definido como su objetivo principal coordinar el trabajo de las distintas autoridades estatales, municipales y federales para lograr el desarrollo sustentable de las comunidades establecidas a lo largo de los 100 kilómetros que comprende la zona fronteriza del lado mexicano. Tal desarrollo implica un uso sustentable del agua. Sin embargo, la competencia formal de estas instituciones acaba cuando estos asuntos sobrepasan la frontera nacional, por lo que deben coordinarse con la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE).

La Comisión Internacional de Límites y Aguas (tanto la sección mexicana como la estadounidense, CILA/IBWC), cuya sección mexicana depende de la SRE, es la única organización que tiene jurisdicción sobre algunos aspectos de los recursos hídricos compartidos por México y Estados Unidos.³¹ Sin embargo, la

²⁹ Véase Semarnat, *op. cit.*, y Cosgrove *et al.*, (2000), capítulo 1.

³⁰ Véase por ejemplo, The Good Neighbour Environmental Board (2000), y Natural Heritage Foundation e Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (2001). Asimismo, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua ha propuesto desarrollar e implantar un plan para el manejo integral del agua en la cuenca del río Bravo (IMTA, 2001, p. 15).

³¹ Aunque la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (Cocef) y el Banco de Desarrollo de América del Norte (Bandan) también operan en ambos lados en la frontera y su trabajo se relaciona con el agua, su mandato está restringido a la certificación y financiamiento, respectivamente, de proyectos de infraestructura ambiental (contaminación del agua, tratamiento de aguas residuales y residuos peligrosos) en la zona fronteriza. El año pasado el mandato se amplió para

CILA no cuenta con las herramientas institucionales, dada su estructura y sus procedimientos, para moverse hacia el nuevo paradigma propuesto de un manejo integral de las cuencas compartidas a lo largo de la frontera.³² Para empezar, su mandato, definido de manera estrecha por el Tratado de 1944, es fundamentalmente técnico y se circunscribe a los asuntos directamente relacionados con los límites fronterizos (la demarcación de la línea fronteriza, la rectificación de canales o la construcción y el control de flujos de agua superficial y su almacenamiento) y con la utilización de aguas internacionales (el desvío de aguas internacionales para uso doméstico y la construcción y mantenimiento de obras de saneamiento) (Mumme, 1999, pp. 94-95 y 100). Este mandato es por lo tanto estrecho en términos geográficos y está restringido a la línea fronteriza y a las aguas fronterizas, lo que limita su capacidad para adoptar una perspectiva de “manejo integral de los ecosistemas” (los ecosistemas se extienden más allá de la frontera). Asimismo, a fin de cumplir con sus funciones, la CILA debe confiar en la capacidad técnica de su personal, en su mayoría formado por ingenieros (la Comisión Nacional del Agua enfrenta una situación similar), por lo que, en general, sus propuestas para solucionar los problemas de escasez de agua no abordan los aspectos políticos y sociales, o incluso legales, culturales y ambientales, cuyo entendimiento es esencial para lograr un manejo integral de las cuencas transnacionales (Székely, 1993, p. 401, e Ingram y White, 1993, p. 175).

Otra barrera que enfrenta la CILA para moverse hacia un nuevo paradigma en el manejo de los recursos transfronterizos es su modelo de resolución de disputas, que es reactivo y se fundamenta en el principio de soberanía nacional. Así, la cooperación técnica y diplomática de las dos secciones nacionales de la CILA opera bajo el principio de la defensa del interés nacional y no considera la viabilidad de los ecosistemas transfronterizos (Ingram y White, *op. cit.*, p. 153). Por lo tanto, a pesar de sus éxitos en temas de cooperación binacional, queda claro que la CILA/IBWC no constituye una institución integrada, con objetivos compartidos, sino que más bien está compuesta de dos instancias diferentes, que responden a sus propias inercias institucionales y a las demandas impuestas por los sistemas políticos de cada país, por lo cual operan de manera paralela y no necesariamente concertada.³³ Esta perspectiva “nacional” ha prevalecido aun cuando la CILA ha visto crecer sus actividades “ambientales”, especialmente las relaciona-

considerar proyectos de infraestructura ambiental en otras áreas, como conservación del agua. Véase Border Environment Cooperation Commission, Informe, septiembre de 2001.

³² Para una visión propositiva y de reforma gradual de la CILA, véase Mumme (1999), pp. 149-166.

³³ Por ejemplo, mientras la CILA responde directamente a los lineamientos de política dictados por la Cancillería mexicana, la IBWC responde a aquellos impuestos por el Congreso, particularmente por los congresistas texanos.

das con los servicios de apoyo municipal para mantener la calidad del agua (Mumme, *op. cit.*, pp. 95-96) y algunas otras actividades asociadas con la conservación de los recursos naturales y del medio ambiente.³⁴ Por otra parte, aunque hoy no le son totalmente ajenas,³⁵ la diseminación de información pública y el fomento de la participación pública en sus reuniones —particularmente en la sección mexicana de la CILA— están excluidas por su estructura diplomática reservada y cerrada, lo que dificulta la instrumentación de soluciones provenientes de la comunidad para la solución de problemas transfronterizos (Sánchez, 1993, pp. 284-287, Cosgrove y Rijsberman, *op. cit.* y Nelly, 1991).

Un impedimento institucional aún más importante es que la CILA/IBWC debe circunscribirse a los parámetros establecidos por el Tratado de 1944, mientras que algunas soluciones a los problemas relacionados con los recursos hídricos transfronterizos entre México y Estados Unidos requieren trascender dicho tratado o bien modificarlo. Como hemos mencionado anteriormente, muchos de los conflictos que hoy enfrentan los gobiernos de ambos países en torno a la escasez del agua se derivan del hecho de que el Tratado de 1944 fuera negociado bajo la premisa de que la disponibilidad del agua en las cuencas compartidas, tanto en el río Colorado como en el río Bravo-Grande, continuaría fija en el futuro (Székely, 1993, pp. 37-38). Sin embargo, el caudal actual de la cuenca del río Bravo-Grande se ha reducido a menos de 40% del caudal existente al momento de la firma del Tratado, solamente 1 653 Mm³ comparados con los 4 500 Mm³ registrados en 1944. Por lo tanto, en las condiciones actuales de sequía extrema y en la ausencia en el Tratado de definiciones consensuadas de los conceptos de “sequía extraordinaria” y “accidente serio” en los sistemas hidráulicos, se da una serie de retos importantes no solamente para la negociación diplomática, sino también para la resolución de conflictos, e incluso para la modificación de las expectativas y posiciones de grupos en ambos lados de la frontera que ya cuentan con su propia interpretación de los eventos.

Acontecimientos recientes han probado la reducida efectividad de los mecanismos tradicionales utilizados por CILA para resolver controversias. Por ejemplo, el Acta 307 se consideró un éxito, en parte porque se llegó a un acuerdo en el calendario para que México pagara su deuda de agua³⁶ y, en parte porque en ella

³⁴ En los últimos años, la CILA logró incorporar en el Acta 306 y 307 algunos elementos innovadores encaminados a incorporar preocupaciones ambientales dentro de su agenda así como incrementar la participación pública.

³⁵ Recientemente, la CILA incluyó a organizaciones no gubernamentales y grupos académicos en algunas de sus actividades, como en dos simposios y dos grupos de trabajo para estudiar el delta del río Colorado y la cuenca del Bravo.

³⁶ Con esta acta, firmada en marzo de 2001, México se comprometió a pagar 700 millones de los 1 600 millones de metros cúbicos que le adeuda a Estados Unidos, pero la sequía fue peor de lo previsto en los escenarios más pesimistas, por lo que se suspendieron las entregas.

los gobiernos de ambos países se comprometían a trabajar conjuntamente para identificar medidas de cooperación en materia de manejo de sequías y de manejo sustentable en la cuenca del río Bravo-Grande. Sin embargo, la sequía impidió que México cumpliera con el calendario negociado y la legalidad misma del Acta 307 fue cuestionada por los agricultores mexicanos del Distrito de Riego 25 (de la cuenca baja del río Bravo-Grande), quienes obtuvieron un amparo por parte de un juez en el estado de Tamaulipas que impide que México transfiera agua según los compromisos alcanzados en dicha acta.

Reconociendo estas complejidades, el potencial que la escasez de agua tiene para generar inestabilidad social, económica y política en la frontera México-Estados Unidos, y las deficiencias institucionales de la CILA, altos funcionarios de la Secretaría de Relaciones Exteriores de México han propuesto la creación de una nueva institución, un Consejo o Comisión Binacional, encargada de manejar de manera integral la cuenca del río Bravo-Grande. México y Estados Unidos también acordaron, en la última reunión de la comisión binacional, contratar a un grupo de especialistas de la Universidad de Nebraska para obtener estudios científicos sobre el fenómeno de la sequía en la frontera y desarrollar políticas públicas de desarrollo para la región, cuyo principal criterio sea la disponibilidad de agua.³⁷

Asimismo, un documento elaborado por el Instituto Mexicano para la Tecnología del Agua (que depende de la Semarnat) propone, entre otras medidas en el mediano plazo (2002-2006), el desarrollo y la implantación de un plan para el manejo integral del agua en la cuenca del río Bravo-Grande. El mismo plantea que, en el marco del Consejo de la Cuenca del Río Bravo-Grande se obtenga “el consenso de los usuarios, los estados y la federación sobre la base de un acuerdo de coordinación para la distribución del agua que incorpore medidas permanentes de conservación del líquido y del suelo” (IMTA, *op. cit.*, p. 10). En este sentido se dirigen también las recomendaciones del último informe del Good Environmental Neighbor Board, que propone un Plan Fronterizo de Agua, y la iniciativa conjunta del Natural Heritage Institute y el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, que busca crear, a partir de un estudio hidrofísico, un modelo comprensivo de planeación que permitirá explorar las oportunidades para ampliar los usos del agua, manteniendo fijo el volumen existente, y revelar el potencial para reducir conflictos futuros sobre el agua.

³⁷ Subsecretario Enrique Berruga, *Reforma*, 22 de agosto de 2001. Confirmado en entrevistas con funcionarios de la Secretaría de Relaciones Exteriores. También véase Carroll (1993), p. 50.

CONCLUSIONES

El caso de la gestión de la cuenca del río Bravo-Grande que acabamos de analizar constituye un excelente ejemplo de la creciente complejidad que caracteriza a los procesos de gobernabilidad de los sistemas socio-ambientales, en este caso particular centrada en la gestión humana de los recursos hídricos. En el caso que nos ocupa, dicha complejidad se ve incrementada tanto por las condiciones extremas del medio ambiente, cuya evolución sigue una trayectoria crecientemente negativa para los ecosistemas de la cuenca, así como también por el carácter internacional de la misma, el cual determina los límites, el alcance y la misma naturaleza de la institucionalidad y de la participación ciudadana en relación a la gestión del agua y del medioambiente en general.

Ahora bien, revisemos el conjunto de preguntas concretas que hemos tratado de explorar y responder tentativamente en este trabajo. En relación con el grado de cumplimiento del objetivo de promover una participación ampliada de la población en la cuenca a través de la implementación de políticas públicas tales como la creación del Consejo de Cuenca, queda claro que los logros han tenido hasta el momento un alcance limitado. Por diversas razones, que incluyen desde la simple exclusión hasta el rechazo por parte de actores sociales clave que rehúsan participar en el organismo; el Consejo constituye una representación fragmentaria de los diversos intereses y enfoques existentes en relación a las prioridades y modalidades que deberían organizar el proceso de gobernabilidad de la cuenca del río Bravo-Grande.

Lo anterior nos permite avanzar en la respuesta a nuestra segunda pregunta, de en qué medida la ampliación de la participación ciudadana en la gobernabilidad de la cuenca constituye un proyecto incipiente y no un proceso con logros objetivamente verificables. En este punto, es importante diferenciar en el análisis dos momentos del proceso. Por una parte, la transformación de la institucionalidad estatal y la creación de nuevos espacios tales como el Consejo de Cuenca, son procesos verticales, “de arriba hacia abajo”, y como tales conllevan el riesgo de alienar o excluir a amplios sectores de la ciudadanía que mantienen una actitud de desconfianza y de toma de distancia con respecto al espacio de lo “estatal”. Muchas décadas de cultura política vertical y paternalista han contribuido a generar esa percepción ciudadana, y la transformación de dicha cultura para dar lugar a formas de interrelación entre estado y ciudadanía fundadas en los principios de la participación democrática y la libre expresión seguramente implicarán procesos de mediano y largo plazo, muy difíciles de acelerar. Por otra parte, la ciudadanía no se ha quedado esperando a que el Estado le otorgue los medios para participar o le indique las formas que la participación debe asumir, sino que más bien se registra una enorme variedad de iniciativas de la sociedad civil que intentan dar cuenta del vacío participativo y de ocupar un espacio en la gober-

nabilidad objetiva de los procesos socio-ambientales de la cuenca. Por lo tanto, aunque muchos de estos actores siguen estando al margen de las instituciones políticas formales, los mismos han acumulado experiencia, capacidad de movilización y acción y conocimiento experto en relación con los problemas que enfrenta la cuenca en términos del desarrollo sustentable y de la preservación del frágil medio ambiente de la región.

En este sentido, por lo tanto, la respuesta a la segunda pregunta es necesariamente que la ampliación de la participación ciudadana en los procesos de gobernabilidad de la cuenca es un proceso que apenas comienza y cuya consolidación y profundización requerirán no solamente de estrategias de mediano y largo plazo sino también de medidas radicales que faciliten el tránsito de formas de acción política verticales y paternalistas a formas crecientemente participativas. Debe tenerse cuidado, sin embargo, en no concebir estas formas como mutuamente excluyentes, ya que el modelo de la gobernabilidad implica en teoría la articulación de las diferentes formas de acción y organización, donde el carácter jerárquico y vertical de las estructuras de poder estatal interactúa con las estructuras de acción de la sociedad civil, que tienden a organizarse sobre la base de los principios de la reciprocidad y la solidaridad voluntarias, y también con las estructuras de mercado, que se organizan en función de los principios de la competencia entre agentes económicos. El grado y la direccionalidad que habrá de asumir dicha interacción en el futuro son aspectos difíciles de predecir en las circunstancias actuales, aunque la situación extremadamente crítica del medio ambiente de la cuenca sugiere que se requerirán acciones estatales urgentes y decididas para consolidar un sistema de gobernabilidad que de cabida a las distintas dinámicas existentes en la región. A las dificultades ya mencionadas para el lado mexicano, deben por cierto sumarse las que se derivan del carácter internacional que asume el sistema de gobernabilidad de la cuenca, al que también nos hemos referido en algún detalle en las páginas anteriores. Indudablemente, no es posible fundar un modelo de gobernabilidad sustentable de la cuenca sobre la base de promover la competencia entre agentes económicos ni sobre la acción voluntaria de las organizaciones civiles, a pesar del aporte significativo y fundamental de estos actores. El Estado, en este caso particular conformado por las distintas instancias federales, estatales y municipales en ambos países, debe jugar un rol central en la estructuración, facilitación y regulación del proceso de gobernabilidad de la cuenca del río Bravo-Grande.

Este punto nos conecta con la última pregunta que intentábamos explorar en este trabajo, a saber, qué es lo que objetivamente se constituye con la ampliación de los espacios de participación en la gestión integrada de la cuenca del río Bravo-Grande. Indudablemente, a pesar de los rezagos, demoras y graves problemas persistentes, las transformaciones que se han puesto en marcha a través de los procesos de descentralización y promoción de distintas formas de participa-

ción, por limitadas y condicionadas que sean, representan un importante paso adelante con respecto al desarrollo histórico previo. Como sugerimos anteriormente, dichos procesos, y la implementación del modelo de manejo integral de cuencas en particular, reflejan un reconocimiento de la crisis que afecta a los sistemas de gobernabilidad de los complejos sistemas socio-ambientales, crisis que asume niveles extremos en regiones tales como la cuenca del río Bravo-Grande. Sin embargo, los cambios institucionales no bastan para transformar las condiciones sociales y políticas que determinan en gran medida el carácter que asume dicho sistema de gobernabilidad, como por ejemplo las fuerzas inerciales de una cultura política tradicional basada en una mutua desconfianza entre el Estado y la sociedad civil o la creciente competencia entre intereses antagónicos, tanto de carácter económico (por ejemplo, competencia entre usos productivos del agua) como político (por ejemplo, competencia entre usuarios de distintas entidades estatales mexicanas o entre usuarios mexicanos y estadounidenses). En este sentido, puede decirse que el proceso de ampliación de los espacios de participación que se ha puesto en marcha, constituye objetivamente un momento necesario aunque no suficiente en la búsqueda de un modelo de gestión integrada de la cuenca basado en los principios de la sustentabilidad ambiental y de la gobernabilidad democrática. Se trata de un proceso fundamentalmente político, cuyo desenvolvimiento dependerá en gran medida de la direccionalidad que continúe asumiendo la transformación de las relaciones Estado-sociedad a nivel nacional en el contexto de la integración creciente con Estados Unidos.

SIGLAS EMPLEADAS

Bandan	Banco de Desarrollo de América del Norte
CCC	Coordinación de Consejos de Cuenca
CEA	Comisiones Estatales de Agua
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CILA	Comisión Internacional de Límites y Aguas
CNA	Comisión Nacional del Agua
Cocef	Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
ONG	Organización no Gubernamental
PIB	Producto Bruto Interno
Prinwass	Proyecto de Investigación "Barreras y condiciones para la participación de la empresa y el capital privados en los servicios de agua y saneamiento en Latinoamérica y África: A la búsqueda de la sustentabilidad económica, social, y ambiental" (http://www.geog.ox.ac.uk/~prinwass/).
TLCAN	Tratado de Libre Comercio de América del Norte
Semarnap	Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca

Semarnat Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
 SRE Secretaría de Relaciones Exteriores
 UPRPS Unidad de Programas Rurales y Participación Social

BIBLIOGRAFÍA

- Amin, A., 1997, *Beyond Market and Hierarchy: Interactive Governance and Social Complexity*, Cheltenham, Elgar.
- Border Environment Cooperation Comission, 2001, *Informe*.
- Brinkerhoff, Derick W., 2000, “Democratic governance and sectoral policy reform: tracing linkages and exploring synergies”, *World Development*, 28 (4), pp. 601-615.
- Carroll, John E., 1993, “Commentary”, *Natural Resources Journal*, 33.
- Castro, José E., 1995, “Decentralization and modernization in Mexico: the case of water management”, *Natural Resources Journal*, 35 (3), pp. 461-487. (ISSN 0028-0739).
- Castro, José E., 1998, “La lucha por el agua y los derechos sociales de ciudadanía: el caso del Valle de México”, *Tèoria e Pesquisa*, 24-27, diciembre, pp. 7-64. (ISSN 0104-0103, Revista del Departamento de Ciências Sociais (CECH, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, Brazil,
- Castro, José E., 2002, “La construcción de nuevas incertidumbres, tecnociencia y la política de la desigualdad: el caso de la gestión de los recursos hídricos”, *Revista Iberoamericana de Ciencias, Tecnología, Sociedad e Innovación*, 2, Organización de Estados Americanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura (ISSN 1681-5645) (<http://www.campus-oei.org/revistactsi/numero2/esteban.htm>).
- Comisión Nacional de Agua, 1994, *Consejo de Cuenca del Río Bravo*, México, CNA.
- Comisión Nacional de Agua, 1994, *Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento*, México, CNA.
- Comisión Nacional de Agua, 2003, *Reunión con la Gerencia de Consejos de Cuenca de la CNA*, 6 de enero, México, CNA.
- Cosgrove, William J. y R. Rijsberman Ranki, 2000, *World Water Vision*, World Water Council.
- Dourojeanni, Axel-Jouravlev Andrei, 2001, “Los dilemas que enfrenta la gestión del agua a inicios del milenio en América Latina y el Caribe”, en *Crisis gobernabilidad en la gestión del agua*, CEPAL, ECLAC, Chile.
- Dourojeanni, Axel-Jouravlev Andrei, 2001, “Motivos que retardan la gestión integrada del agua”, en *Crisis de gobernabilidad en la gestión del agua*, CEPAL, ECLAC, Chile.
- El Universal*, 24 de marzo del 2002.

- The Good Neighbour Environmental Board, 2000, "Fourth Report of the Good Neighbor Environmental Board to the President of the United States", septiembre.
- Hirst, P., 1994, *Associative Democracy: New Forms of Economic and Social Governance*, Cambridge, Polity Press.
- IMTA, 2001, *Recursos Hídricos en la Frontera Norte*, [Resumen Ejecutivo], México, IMTA.
- Ingram, Helen y David R. White, 1993, "International Boundary and Water Commission: An Institutional Mismatch for Resolving Transboundary Water Problems", *Natural Resources Journal*, 33.
- Interamerican Development Bank (IDB), 1998, *Facing up to Inequality in Latin America. Economic and Social Progress in Latin America*, Washington, D.C., IDB.
- Kelly, Mary, 1991, *Facing Reality: The Need for Fundamental Changes in Protecting the Environment Along the US/Mexico Border*, Texas Center for Policy Studies.
- Kelly, Mary, 2001, *The Río Conchos: A Preliminary Overview*, Texas Center for Policy Studies, Texas, EUA.
- Kooiman, Jan, 2000, "Societal Governance: Levels, Modes, and Orders of Social-Political Interaction", en Pierre, J. (ed.), *Debating Governance. Authority, Steering and Democracy*, Oxford University Press, Oxford.
- McCarney, P. (ed.), 1993, "Innovation and Reform in Transboundary Resource Management: A Critical Look at the International Boundary and Water Commission, United States and Mexico", *Natural Resources Journal*, 33, invierno, pp. 157-158.
- McCarney, P. (ed.), 1996a, *Cities and Governance. New Directions in Latin America, Asia and Africa*, Toronto, Centre for Urban and Community Studies, University of Toronto.
- McCarney, P. (ed.), 1996b, *The Changing Nature of Local Government in Developing Countries*, Toronto, Centre for Urban and Community Studies, University of Toronto.
- McCarney, P. (ed.), 1999, "Managing Acute Water Scarcity on the US-Mexico Border: Institutional Issues Raised by the 1990's Drought", *Natural Resources Journal*, 39.
- México/SEMARNAP/CNA, 2000, "El agua en México: retos y avances", en *Crisis de Gobernabilidad en la gestión del agua*, Chile, 2001.
- Natural Heritage Foundation e Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, 2001, *Río Bravo/río Grande: Diseñado el Futuro. Una Evaluación de las Oportunidades para Mejorar la Administración de los Recursos Hidráulicos Binacionales de la Cuenca del río Bravo*, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey.
- Picciotto, Robert, 1997, "Putting institutional economics to work: from participation to governance", en Clague, Christopher K. (ed.), *Institutions and*

- Economic Development: Growth and Governance in Less-developed and Post-socialist Countries*, Baltimore and London, John Hopkins University Press.
- Revelle, R. y P. Waggoner, 1993, "Effects of a Carbon Dioxide-Induced Climate Change on Water Supplies in the Western United States", en Abrahamson, D. (ed.), *The Challenge of Global Warming*, citado en Székely, Alberto, "How to Accommodate an Uncertain Future into Institutional Responsiveness and Planning: The Case of Mexico and the United States", *Natural Resources Journal*, 33.
- Sánchez Roberto, 1993, "Public Participation and the IBWC: Challenges and Options", *Natural Resources Journal*, 33.
- SEMARNAT, 2003, *Cruzada Nacional por los Bosques y el Agua*, www.semarnat.gob.mx.
- Solanes, Miguel, 2000, *Informe preliminar de misión a México*, División de Recursos Naturales e Infraestructura, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago de Chile.
- Steinberg, Paul F., 2002, "Civic environmentalism in developing countries: opportunities for innovation in state-society relations", en *World Development Report 2003. Dynamic Development in a Sustainable World Background Paper*, Washington, The World Bank (<http://econ.worldbank.org/wdr/wdr2003/library/doc?id=16677>).
- Streck, W. y Ph. Schmitter, 1985, *Private Interest Government*, London, Sage.
- Swyngedouw, Erik A., 2000, "Authoritarian governance, power and the politics of rescaling", en *Environment and Planning D. "Society and Space"*.
- Swyngedouw, Erik, A. Ben Page y María Kaika, 2002, *Governance, water, and globalisation: a political-ecological perspective*, Oxford, School of Geography and the Environment.
- Swyngedouw, Erik, José E Castro y María Kaika, 2002, "Urban water: a political-ecology perspective", *Built Environment* (ISSN 0263-7960), Special Issue on *Water Management in Urban Areas*, 28 (2), pp. 124-137.
- Székely, Alberto, 1993, "Emerging Issues: Mexico and the United States", *Natural Resources Journal*, 33, Invierno.
- United Nations Development Programme, 1997, *Governance for Sustainable Growth and Equity*, New York, UNDP.
- Verruga, Enrique, *Reforma*, 22 de agosto de 2001.
- World Bank, 1992, *Governance and Development*, Washington DC., World Bank.

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS CON HIDROCARBUROS: CAUSAS, EFECTOS, RIESGOS ASOCIADOS Y MEDIDAS DE PREVENCIÓN

*Susana Saval Bohórquez, Fernando Lara Guerrero,
Juan Manuel Lesser Illades y Juan Manuel Nieto Calleja*

INTRODUCCIÓN

La importancia del agua subterránea, como fuente de abastecimiento para consumo humano, requiere de una protección para contrarrestar los efectos negativos originados por la contaminación de tipo antropogénico. La presencia, cada vez mayor, de compuestos ajenos a la composición natural del agua subterránea constituye una alteración en su calidad.

Por otro lado, el amplio uso de los hidrocarburos en nuestra sociedad está asociado a las actividades de exploración, explotación, refinación, distribución y comercialización, así como su empleo principalmente como combustibles para las industrias de transformación y del transporte. Estas actividades implican un intenso manejo de hidrocarburos con el inminente riesgo de que puedan ocurrir descargas en el ambiente con implicaciones de contaminación cuya magnitud y consecuencias están en función de las características del sitio afectado.

Al ocurrir un derrame de petróleo crudo o de sus combustibles destilados, inmediatamente los productos tienden a dispersarse e infiltrarse hacia el subsuelo en donde las condiciones lo permiten. En una superficie pavimentada los productos pueden viajar varios cientos de metros de manera horizontal hasta que encuentran algún acceso a una instalación subterránea, por ejemplo una alcantarilla o un registro de energía eléctrica o de teléfonos, en esos casos es prácticamente imposible controlar su migración. Si se trata de un terreno natural, los productos se infiltran de manera inmediata hacia los diferentes estratos, una parte se retiene en el material geológico, pero el mayor volumen migra de manera vertical varios metros por acción de la gravedad, y en muchos casos alcanza el agua subterránea, a partir de ese momento, la migración ocurre en dirección preferencial del flujo subterráneo. Las características propias de los combustibles, así como las del subsuelo determinan la distribución, acumulación y migración de

los hidrocarburos en cada sitio. De aquí que cada problema de contaminación conceptualmente será único.

Para evaluar el grado de contaminación de un acuífero es indispensable integrar una gran variedad de información, la cual debe ser verificada y ampliada de manera rápida y continua, en virtud de la dinámica natural de un acuífero. Si la afectación se da en una fuente de abastecimiento doméstico-urbano, el riesgo se debe enfocar fundamentalmente a la presencia de hidrocarburos peligrosos a la salud humana, por ejemplo el benceno. En el caso de acuíferos cuyo uso prioritario no sea el doméstico-urbano, la contaminación también debe ser atendida de manera inmediata, pero aquí el riesgo debe ser analizado desde otra perspectiva. Lo más importante es contar con un sustento técnico confiable que sirva como base para plantear las diferentes alternativas de solución, tanto para restituir el abastecimiento de agua, como para tomar acciones de remediación.

Existen en México varios casos de acuíferos contaminados con hidrocarburos y aunque están siendo sometidos a programas de saneamiento, las posibilidades de continuar su explotación como fuentes de abastecimiento son muy reducidas. De aquí surge la conveniencia de promover programas de prevención enfocados primordialmente a la protección de la calidad del agua subterránea, ya que su costo de implementación y seguimiento son mínimos comparados con el costo requerido para el saneamiento de los acuíferos.

En cuanto al aspecto legal y normativo de la contaminación de acuíferos, parece haber un avance en las leyes o estar en camino de lograrlo, pero los reglamentos y las normas oficiales son aún incipientes o necesitan ser actualizados. En este sentido, es mucho el trabajo que falta por hacer, pero al mismo tiempo es necesario promover un marco de referencia integral "suelo-agua subterránea", basado en una integración y coordinación al interior de la propia Secretaría del ramo.

CAUSAS DE LA CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS CON HIDROCARBUROS

Para hablar de las causas que conducen a la contaminación de acuíferos con hidrocarburos es necesario revisar primero las potenciales fuentes que originan un derrame. Entre las más comunes se pueden citar las siguientes: prácticas inadecuadas de manejo de crudo y sus productos, tomas clandestinas en zonas de ductos; derrames provocados por accidentes carreteros o ferroviarios; corrosión de tanques de almacenamiento de combustibles; corrosión o ruptura de ductos superficiales y subterráneos; fallas por falta de mantenimiento de instalaciones; falla de la infraestructura provocada por fenómenos naturales extremos (vientos, huracanes y sismos, entre otros); errores humanos de operación; instalaciones subterráneas abandonadas; ruptura de drenajes aceitosos; descargas accidentales o deliberadas de aguas residuales de proceso en canales y ríos; operación de insta-

laciones con uso intensivo de hidrocarburos sobre terreno natural sin losa, ni diques impermeables; ausencia de programas de reposición de infraestructura al término de su vida útil; ausencia de drenajes aceitosos; deficiencias en las actividades de perforación de pozos y en general, falta de una cultura de prevención.

La mayor parte de los casos de contaminación de acuíferos que actualmente existen son consecuencia de eventos que en su momento ocurrieron a nivel de la superficie. El corto tiempo del que se dispone para actuar antes de evitar la infiltración de los combustibles al subsuelo, así como la dificultad para controlar un derrame cuando se trata de grandes volúmenes, son aspectos que quedan fuera del alcance humano y resultan en afectaciones de magnitud incalculable en el momento preciso del accidente. Por lo general, se considera que el suelo por su capacidad amortiguadora puede retener líquidos y partículas sólidas, para evitar así que cualquier derrame llegue al agua subterránea. Sin embargo, su capacidad amortiguadora tiene un límite físico que cuando se ve rebasado permite el paso de contaminantes hacia al acuífero.

Lo anterior lleva a la inminente necesidad de conocer varios conceptos básicos antes de evaluar cualquier problema de contaminación. Éstos están íntimamente relacionados con la constitución del suelo y del subsuelo, así como con la química y fisicoquímica de los hidrocarburos y aditivos asociados. En la medida que se comprenda su interrelación, se podrá predecir con mayor certidumbre su comportamiento en el subsuelo.

LOS DIFERENTES MATERIALES DEL SUBSUELO Y TIPOS DE ACUÍFEROS

Los materiales que constituyen el subsuelo se clasifican con base en su conductividad hidráulica y su permeabilidad. Estos conceptos han sido utilizados de manera indistinta para describir la capacidad de un material para transmitir el agua subterránea. Sin embargo, no son equivalentes ya que la permeabilidad intrínseca sólo es función del medio poroso, mientras que la conductividad hidráulica incluye a las propiedades del medio y del agua contenida en éste.

La permeabilidad es la facilidad con la que un fluido puede transitar a través de los espacios vacíos que se encuentran entre los granos. Con esta base, la conductividad de los materiales geológicos se pueden dividir en dos grandes grupos: materiales permeables y materiales impermeables. Los materiales permeables son aquellos que permiten la infiltración y la circulación del agua subterránea y de contaminantes, mientras que los impermeables son los que limitan esta circulación debido a la ausencia de huecos o espacios libres a través de los cuales se puede establecer un flujo.

Los materiales permeables más comunes son los aluviones, las calizas carstificadas y los basaltos fracturados. Los aluviones corresponden a alternancias o

mezclas de arenas, gravas, arcillas y limos. Estos materiales granulares varían de finos (arcillas) a gruesos (gravas). Las arcillas corresponden a materiales granulares muy finos, donde cada grano presenta un diámetro menor a $1/256$ de milímetro. Las arenas están constituidas por granos de entre 1 y 2 mm de diámetro, mientras que los limos presentan partículas de tamaño intermedio entre las arcillas y las arenas.

En las arcillas prácticamente no existen espacios libres a través de los cuales el agua o el contaminante líquido pueda circular, su conductividad hidráulica típica es de 10^{-7} cm/seg. Además, las arcillas tienen un alto contenido de materia orgánica en la cual se pueden retener una gran cantidad de agua y sustancias químicas. Se caracterizan por ser un material que puede adsorber grandes cantidades de hidrocarburos, pero no permite que fluyan hacia otros sitios. Esta propiedad hace que las arcillas constituyan una capa protectora de la contaminación de acuíferos ubicados a mayores profundidades, por eso se dice que tienen gran capacidad amortiguadora. Debido a su baja permeabilidad, estos materiales también representan el mayor obstáculo para el saneamiento de acuíferos, ya que en ellos predomina el fenómeno de la difusión el cual requiere de decenas de años para permitir el desplazamiento o salida de los contaminantes.

Las arenas son los constituyentes principales de los acuíferos de tipo granular, presentan alta conductividad hidráulica, de hasta 10^{-2} cm/seg, lo cual permite el fácil tránsito de fluidos a través de ellas, ya sea de agua o de hidrocarburos. Su reducido contenido de materia orgánica limita la retención de sustancias, de aquí su baja capacidad amortiguadora. De manera opuesta a las arcillas, la alta permeabilidad de las arenas hace que los acuíferos presenten alta vulnerabilidad, es decir, una mayor facilidad para la contaminación.

En la naturaleza es común encontrar mezclas de materiales de diferente granulometría, que en la mayoría de los casos se presentan en forma de capas horizontales alternadas. Ello lleva a la presencia de horizontes permeables intercalados con horizontes impermeables, donde se pueden formar zonas acuíferas ubicadas a diferentes profundidades. Generalmente, las zonas acuíferas que se encuentran cercanas a la superficie son las más afectadas por la presencia de contaminantes. Debido a que los hidrocarburos flotan sobre el agua, la zona más contaminada se ubica entre la superficie del terreno y el nivel del agua subterránea.

La zona a partir de la cual se encuentra el agua subterránea se identifica como zona saturada, para diferenciarla de la zona vadosa o no saturada, en donde los espacios interpartícula contienen solamente gases. En la interfase entre las zonas vadosa y saturada se encuentra una porción que se conoce como zona de capilaridad. Esta última, así como el nivel freático o estático pueden estar variando conjuntamente de posición por efecto natural, de tal forma que, durante la época de estiaje el nivel del agua estará más profundo, mientras que en la época de lluvias, el nivel del agua estará más cercano a la superficie.

Las calizas son depósitos de carbonato de calcio solubles en agua y que en ciertos sitios, presentan fracturas y conductos de disolución que permiten la libre circulación de agua y contaminantes a través de ellas. Los basaltos son rocas que comúnmente presentan abundante fracturamiento interconectado, el cual permite la fácil infiltración y circulación de agua y contaminantes en el subsuelo. Ambos dan lugar a la formación de acuíferos de alto rendimiento.

Existen además, estructuras geológicas que influyen en el control de la contaminación del suelo y del agua subterránea, éstas son las fallas y las fracturas. Ambas pueden funcionar como barreras o como conductos preferenciales del flujo subterráneo y llegan a provocar comunicación de agua y contaminantes de un horizonte acuífero superior hacia otro inferior.

CARACTERÍSTICAS DE LOS HIDROCARBUROS

El petróleo es una mezcla de hidrocarburos, compuestos heterocíclicos, asfaltenos y resinas. Los hidrocarburos son los constituyentes que se encuentran en mayor proporción y están formados básicamente por átomos de carbono e hidrógeno con diversas conformaciones moleculares. Incluye compuestos que van del más sencillo que es el metano con un sólo átomo de carbono (C_1) hasta compuestos muy complejos que pueden tener hasta cerca de 100 átomos de carbono (C_{100}). Los hidrocarburos pueden ser saturados y no-saturados, los primeros se caracterizan por tener enlaces sencillos entre los átomos de carbono, mientras que los no-saturados tienen dobles ligaduras. En cualquiera de los dos grupos químicos, hay cadenas lineales rectas o ramificadas, además de estructuras moleculares cíclicas.

Para la producción de combustibles, el petróleo crudo se somete a altas temperaturas mediante el proceso de "cracking", seguido de la refinación propiamente, en la cual a diferentes intervalos de temperatura se obtienen por destilación los diversos combustibles. Cada combustible es una mezcla de gran cantidad de hidrocarburos químicamente diferentes. La gasolina contiene por lo menos 120 hidrocarburos, cuyos pesos moleculares están entre C_5 y C_{10} , y destilan entre 30 y 225°C; el diesel tiene más de 140 hidrocarburos entre C_{11} y C_{25} , que destilan entre 180 y 350°C, mientras que la kerosina, conocida también como queroseno o diáfano, presenta alrededor de 100 hidrocarburos, cuyos pesos moleculares y temperaturas de destilación son intermedios a los dos combustibles mencionados. El combustóleo, que es prácticamente el residuo de destilación, contiene los hidrocarburos de más alto peso molecular los cuales son también los más complejos.

Gasolinas, turbosina y diesel, son formulados antes de salir a la venta, en este proceso son incorporados aditivos cuya función puede ser por ejemplo: evitar

la detonación, aumentar la combustión o aumentar la potencia, entre otros. Estos aditivos, al igual que los hidrocarburos son considerados contaminantes del subsuelo. La presencia de uno u otro aditivo sirve como un indicativo de la época en la que ocurrió el derrame. Por ejemplo, la gasolina tipo Nova que desde hace varios años ya no se produce en México contenía tetraetilo de plomo, mientras que las gasolinas de nueva generación, Magna y Premium, contienen metilterbutiléter (MTBE).

Un aspecto que es necesario resaltar es que las características de cada combustible son una función directa de las características de sus componentes individuales. Esto es lo que marca la diferencia de su comportamiento en el ambiente. Lo único que sí comparten todos los combustibles es la posibilidad de flotar sobre el agua, ya que su densidad es menor a la de ésta. La literatura internacional los refiere como LNAPL's (*Light Non-Aqueous Phase Liquids*), para diferenciarlos de los DNAPL's que son más pesados que el agua (*Dense Non-Aqueous Phase Liquids*), los cuales forman una capa por debajo del agua.

El comportamiento de los hidrocarburos, así como todo lo relacionado con su transporte y destino, está dado por sus características fisicoquímicas que son: solubilidad, coeficiente de distribución octanol / agua, coeficiente de sorción, constante de la Ley de Henry y presión de vapor, las cuales a su vez están relacionadas con su peso molecular. Todas estas características están íntimamente relacionadas entre sí y junto con las características del subsuelo marcan el comportamiento individual de cada hidrocarburo. En la tabla 1 se presentan las características fisicoquímicas de los hidrocarburos más comunes, están enlistados en orden creciente en cuanto a peso molecular y al mismo tiempo, en orden decreciente respecto a su solubilidad en agua.

El coeficiente de distribución octanol / agua ($K_{O/W}$) es el que indica la posición que tomará una sustancia cuando existen conjuntamente una fase orgánica y una acuosa. Esto significa que cuando existe una capa de hidrocarburos que están flotando sobre el agua, cada hidrocarburo de manera individual tomará la posición que determine el valor de su coeficiente, es decir, si se queda flotando en la capa de combustible o si se disuelve en el agua subterránea. Esta característica, tiene relación con la solubilidad, de manera que los hidrocarburos más solubles en agua, como el benceno, tienen menores cifras del $K_{O/W}$ (tabla 1).

Cada hidrocarburo tiene también cierta afinidad por el carbono orgánico del suelo, la cual se expresa a través del coeficiente de sorción (k_{oc}). Aquellos hidrocarburos que presentan valores altos de k_{oc} son los que permanecen más asociados a las partículas de suelo y al mismo tiempo son los que presentan menor solubilidad en agua. Los hidrocarburos poliaromáticos son un ejemplo de éstos (tabla 1).

En relación a la volatilidad, está directamente relacionada con la constante de la Ley de Henry y con la presión de vapor. Estas dos características son las que per-

miten detectar la presencia de hidrocarburos volátiles en el subsuelo. Los hidrocarburos más volátiles son los de menor peso molecular, especialmente benceno, tolueno, xilenos y etilbenceno, comúnmente conocidos como BTEX (tabla 1).

A partir de sus características, se puede establecer que los hidrocarburos en el subsuelo se pueden encontrar en diferentes fases: i) Como gases alojados en los espacios intersticiales del material granular especialmente en la zona vadosa, ii) adsorbidos a la materia orgánica del suelo, iii) disueltos en el agua subterránea, y iv) en forma líquida como una capa que flota sobre el agua.

Una vez que los hidrocarburos llegan al acuífero, la forma y extensión de la mancha de contaminación, depende del tipo de materiales que conforman el subsuelo y de los mecanismos de transporte: advección, dispersión y difusión, en los casos. Para aquellas sustancias cuya densidad es mayor a la del agua su movimiento estará controlado por la presencia de capas de baja permeabilidad y por la topografía del subsuelo.

RIESGOS ASOCIADOS A LA CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS CON HIDROCARBUROS

En temas de contaminación de acuíferos con hidrocarburos existen tres enfoques de riesgo que son: 1) riesgo de explosión; 2) riesgo ecológico, y 3) riesgo a la salud humana. Los riesgos asociados a cada caso específico dependen del tipo de hidrocarburos y de las características del escenario afectado.

El riesgo de explosión se da principalmente cuando hay hidrocarburos volátiles que se alojan en espacios abiertos donde existe oxígeno, por ejemplo en drenajes, lumbreras y registros de teléfonos y de energía eléctrica, y donde además puede existir una chispa o un detonador. El riesgo por explosión existe cuando los hidrocarburos presentes son ligeros, los cuales son volátiles a temperatura ambiente, ejemplo de éstos son los BTEX, componentes de las gasolinas.

El riesgo ecológico considera la afectación a la integridad de especies de flora y fauna terrestres y acuáticas, debida a la presencia de hidrocarburos en suelo y cuerpos de agua superficiales. Este tipo de riesgo se puede evaluar de manera muy práctica cuando las especies tienen un valor comercial o están en peligro de extinción y el número de ellas se tiene previamente referenciado. El riesgo ecológico en un escenario superficial se da cuando hay un derrame de cualquier tipo de combustible, pero los efectos son mayores cuando se trata de hidrocarburos pesados, presentes principalmente en el crudo y el combustóleo, ya que éstos se quedan preferentemente en la superficie, en cambio, cuando los combustibles son más fluidos como la gasolina, la turbosina y el diesel, una parte se queda retenida en el suelo, mientras que otra tiende a infiltrar hasta encontrar el nivel del agua subterránea.

Los hidrocarburos pesados son no-volátiles, se quedan retenidos en el suelo, circulan distancias cortas y no alcanzan grandes profundidades, tienden a permanecer en el mismo sitio del derrame. Son prácticamente insolubles en agua, pero conforman capas flotantes en aguas subterráneas cuando el nivel estático está muy cerca de la superficie, o cuando en el mismo medio están presentes hidrocarburos ligeros o intermedios, los cuales actúan como disolventes y arrastran a los pesados. Los riesgos asociados en este caso, se refieren a la pérdida de especies de vegetales debido a que los hidrocarburos forman una película que rodea a las partículas del suelo, la cual limita la absorción de agua y de nutrientes, así como la muerte de los microorganismos asociados a las raíces de las plantas, que ocasiona también una marcada limitación de oxígeno.

En un cuerpo de agua superficial, la presencia de hidrocarburos pesados provoca la muerte de especies de fauna, la cual se da por asfixia, más que por intoxicación, ya que estos hidrocarburos forman una capa que impide el paso del oxígeno al interior del cuerpo de agua y la salida del bióxido de carbono hacia el exterior, conformando así un ambiente anaerobio.

En el caso de los acuíferos, el concepto de riesgo ecológico se refiere a la vulnerabilidad, esto es, la posibilidad de afectación de las aguas subterráneas por la presencia de hidrocarburos que alteran su calidad. Esta vulnerabilidad es una función directa de las características del subsuelo y del entorno. Los casos más críticos se refieren a la existencia de una capa de combustibles en fase libre que flotan sobre el nivel estático, y también al crecimiento de la mancha de contaminación por efecto del flujo subterráneo. Gasolina, turbosina y diesel son los principales combustibles contaminantes de aguas subterráneas, sus constituyentes más solubles en agua, como son: MTBE, benceno, tolueno, xilenos, etilbenceno y naftaleno (tabla 1), son los que avanzan con mayor facilidad y describen manchas de contaminación de gran extensión.

Los principales riesgos asociados a la salud humana derivados de la contaminación de acuíferos con hidrocarburos son la inhalación de vapores y la ingestión de aquellos hidrocarburos que están disueltos en agua, en algunos casos también se considera el contacto dérmico que se da principalmente en actividades recreativas. Este tipo de riesgo se da principalmente por el benceno, componente típico de gasolinas y turbosina, y que también se encuentra en el diesel (Saval *et al.*, 2003) el cual es carcinógeno a humanos por las vías de exposición de inhalación e ingestión. Debido a la solubilidad del benceno en agua, 1 750 mg/L (tabla 1), el arrastre por acción de la lluvia a partir de suelos contaminados constituye un importante riesgo de afectación a las aguas subterráneas. El MTBE, tiene una alta solubilidad en agua aún mayor al del benceno, de 48 000 mg/L, y aunque no se ha confirmado ser un carcinógeno a humanos su presencia en el agua es indeseable. El riesgo de que un individuo ingiera agua contaminada con hidrocarburos es mínimo cuando su apariencia y su olor son motivo de rechazo.

TABLA 1
 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE ALGUNOS HIDROCARBUROS Y ADITIVOS PUROS

Substancia	Número de átomos de carbono	Peso molecular (g/mol)	Solubilidad en agua a 20-25°C (mg/L)	log (K _{OW}) Coeficiente de distribución octanol/agua	k _{oc} Coeficiente de sorción cm ³ /g	Constante de la Ley de Henry (adim)	Presión de vapor (a 20-25°C) (mm Hg)
MTBE (aditivo)	5	88.1	48 000	1.3	12	0.0204	250
Tetraetil de plomo (aditivo)	8	323	0.21	4.9	4 900	23.3	30
Benceno	6	78.1	1 750	2.1	59	0.228	95
Tolueno	7	92.1	526	2.8	180	0.272	28
Xilenos	8	106.2	198	3.3	240	0.290	8.8
Etilbenceno	8	106.2	169	3.1	360	0.323	9.6
Naftaleno	10	128.2	31	3.4	2 000	0.0198	0.085
Acenafeno	12	154.2	4.24	3.9	7 100	0.00636	0.0023
Acenafileno	12	152.2	3.93	3.9	4 800	0.00467	0.00091
Fluoreno	13	166.2	1.98	4.2	14 000	0.00261	0.0084
Fenantreno	14	178.2	1.29	4.6	23 000	0.00160	0.00011
Antraceno	14	178.2	0.0434	4.6	30 000	0.00267	0.0000027
Fluoranteno	16	202.3	0.206	5.1	110 000	0.00066	0.000000012
Pireno	16	202.3	0.135	5.1	110 000	0.00045	0.0000025
Benzo(a)antraceno	18	228.3	0.0094	5.7	400 000	0.000137	0.000000031
Criseno	18	228.3	0.0016	5.7	400 000	0.00388	0.000000062
Benzo(a)pireno	20	252.3	0.0016	6.1	1 000 000	0.0000463	0.000000055
Benzo(b)fluoranteno	20	252.0	0.0015	6.2	1 200 000	0.00455	0.0000005
Benzo(k)fluoranteno	20	252.3	0.0008	6.2	1 200 000	0.000034	0.00000000097
Dibenzo(a,h)antraceno	22	278.4	0.00249	6.7	3 800 000	0.00000603	0.0000000001
Benzo(g,h,i)perileno	22	276.3	0.00026	7.1	7 800 000	0.0000109	0.0000000001
Indeno(1,2,3,c,d)perileno	22	276.3	0.000022	6.7	3,500,000	0.0000656	0.0000000001

Adaptado de varias fuentes para unificar unidades

Pero cuando están en baja concentración y no son percibidos por el consumidor, el riesgo de ingestión y el daño a la salud pueden ser muy altos.

ALGUNOS ESCENARIOS QUE SE HAN ESTUDIADO

En México se han detectado varios sitios contaminados con afectación a las aguas subterráneas. Por razones de confidencialidad no es posible revelar su localización, sin embargo, se hace referencia a ellos para ejemplificar diferentes escenarios y situaciones de riesgo particulares. Todos los casos actualmente son expedientes abiertos para las autoridades ambientales y al mismo tiempo, constituyen experiencias de remediación.

Caso 1. En una zona industrial asentada sobre sedimentos arcillosos de origen lacustre, ocurrieron varios derrames de gasolina y diesel. Los combustibles infiltraron hasta alcanzar el nivel de las aguas freáticas. Las arcillas, conforman una capa de 40 metros de espesor que funciona como acuitardo (material que permite la entrada de agua pero impide o limita su salida por retención molecular). Bajo las arcillas, a 50 metros de profundidad se encuentra un acuífero de gran potencial. El flujo subterráneo en las arcillas es muy reducido, presenta una permeabilidad entre 10^{-7} y 10^{-9} m/seg. Las lluvias de temporada ocasionan una variación de la profundidad al nivel freático y con ello del espesor de la capa de hidrocarburos que se encuentran en fase libre. Aunque se ha detectado benceno en las aguas freáticas, no existe afectación en el acuífero profundo. Las arcillas funcionan como protector de las aguas subterráneas inferiores y limitan el movimiento del contaminante. En este caso, los riesgos asociados por explosión, la contaminación del acuífero profundo y el riesgo a la salud son muy bajos (figura 1).

Caso 2. En una zona urbana, cuyo subsuelo está constituido en sus aproximadamente 20 metros superiores por arenas pumíticas altamente permeables y bajo ellas materiales volcánicos y aluviones, se registró una fuga de gasolina y diesel los cuales infiltraron rápidamente al subsuelo hasta el nivel freático que se encuentra a entre 5 y 15 metros de profundidad. La zona no saturada entre la superficie y el nivel freático permite la libre circulación de volátiles, lo cual ocasiona la acumulación de éstos en instalaciones subterráneas, donde el riesgo por explosión es alto. No existe contaminación en el acuífero profundo a 40 metros de profundidad que se utiliza para consumo humano, por lo que se asume que no hay riesgo a la salud (figura 1).

Caso 3. Una zona urbano-industrial cuyo subsuelo está formado por rocas calizas que se elevan entre 10 y 20 m sobre el nivel del mar, presenta una muy alta permeabilidad a través de conductos de disolución. Las calizas están cubiertas por una capa de arcilla calcárea de alrededor de 5 metros de espesor, la cual

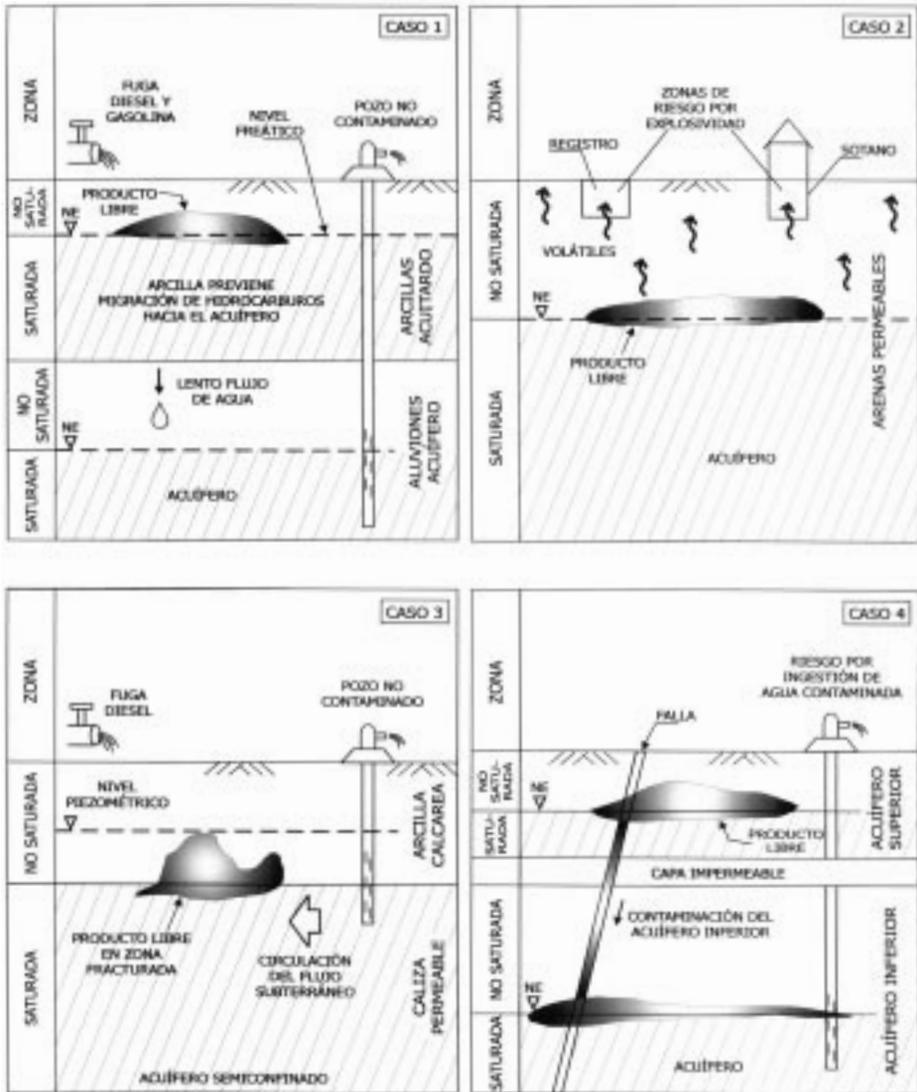


FIGURA 1. Modelos conceptuales de casos de contaminación de acuíferos.

ha funcionado como una capa de protección de la contaminación directa al acuífero calizo. En esta zona, se registró un derrame puntual de combustibles destilados, que infiltraron al subsuelo y se alojaron sobre el nivel del agua subterránea que se encuentra a alrededor de 3 m de profundidad. No se detectaron hidrocarburos adsorbidos en el suelo, pero sí se encontraron benceno y xilenos disueltos en el agua subterránea, en una zona bien delimitada la cual asegura que no ha existido migración de hidrocarburos. El riesgo por explosión es insignificante, el riesgo por ingestión es también mínimo debido a que la calidad del agua de la región es mala, pero el acuífero afectado parece corresponder al mismo de toda la región (figura 1).

Caso 4. En una zona urbano-industrial se detectaron hidrocarburos, mezclas de gasolina y diesel, en pozos de abastecimiento en un horizonte acuífero cuyo nivel estático se encuentra aproximadamente a 15 metros de profundidad. Existen además otros dos acuíferos, uno denominado intermedio a 30 metros de profundidad y otro denominado inferior a mayor profundidad. El subsuelo de la región está conformado principalmente por materiales aluviales y en menor proporción tobas y derrames lávicos, que permiten la circulación del flujo subterráneo. Existen fracturas que unen los acuíferos superior e intermedio, las cuales ocasionaron que los combustibles alojados en el acuífero superior viajaran fácilmente hacia el acuífero intermedio. En este caso, el riesgo a la salud es alto, en virtud de que el benceno está presente en los dos acuíferos que como se dijo anteriormente, son de abastecimiento (figura 1).

En cuanto a las acciones de saneamiento de los casos presentados, el hecho de haber encontrado producto en fase libre llevó inmediatamente a su extracción a través de bombeo. A pesar de que esta actividad se ha realizado durante varios años en 3 de los 4 casos mencionados, en ninguno de ellos se ha podido concluir, ya que los hidrocarburos siguen desorbiéndose de las capas de suelo y se hacen evidentes como pequeños espesores de producto libre o en forma de emulsión, la heterogeneidad del subsuelo hace difícil el poder establecer el tiempo que tomará esta desorción.

Como parte del saneamiento, se hace necesario retirar del agua subterránea todos aquellos hidrocarburos que se encuentran en forma emulsionada o disuelta, ello involucra bombeo y tratamiento antes de su reinyección al acuífero. Las opciones para el tratamiento del agua son: aeración para volatilizar los hidrocarburos más ligeros y retención de los restantes en una matriz que generalmente es carbón activado, sin embargo, lo más efectivo es la combinación de ambas, ya que un solo tipo de tratamiento no puede asegurar la reducción en la concentración de todos los hidrocarburos presentes, hasta los niveles deseados. Conviene mencionar que el tratamiento del agua subterránea y su reinyección al acuífero en pozos localizados aguas arriba, permite acelerar el movimiento del flujo subterráneo.

El costo de saneamiento de acuíferos es un tema que debe tratarse caso por caso, ya que es una función directa de varios aspectos entre los que resaltan: las características del subsuelo, las dimensiones de la mancha de contaminación, el espesor de producto libre, el volumen de agua subterránea a tratar, la concentración inicial de los contaminantes y los niveles de limpieza que pretenden ser alcanzados. Lo que si se puede generalizar es que la mayor parte del costo se refiere a la inversión en equipo, su operación y mantenimiento, ya que la labor y la disposición final del carbón activado representa solamente una mínima parte. A manera de ejemplo se puede citar que en el caso más complejo, la remediación del acuífero ha representado un costo aproximado de 50 millones de pesos, considerando dentro de este rubro la construcción de pozos de extracción como parte de la infraestructura necesaria.

Otro factor importante que es necesario resaltar se refiere al tiempo que toma una remediación, el cual incide directamente sobre el costo de la misma. Se podría establecer que en promedio se requieren por lo menos de 8 a 10 años de trabajo constante, sin interrupciones, para lograr resultados aceptables, sin embargo, de las experiencias que se han tenido en México, aún no se puede establecer el tiempo que tomará la remediación de un acuífero, ni el costo total, ya que hasta la fecha ningún caso se ha dado por concluido técnicamente, ni administrativamente. Con esto se hace evidente una muy baja factibilidad de lograr los resultados deseados, debido a las limitaciones propias del subsuelo, en especial al fenómeno de adsorción-desorción que ocurre en las capas de suelo cercanas al nivel estático, que se traduce en un aporte constante de hidrocarburos hacia el agua subterránea. Desde este punto de vista, tal vez los esfuerzos deberán enfocarse a encontrar otro tipo de soluciones.

MARCO LEGAL Y NORMATIVO

En casos de contaminación de acuíferos existen dos leyes aplicables, una es la Ley de Aguas Nacionales, (LAN, 1992) y la otra es la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA, 1988; modificada en 1996). La primera considera únicamente a los residuos sólidos y las descargas de aguas residuales como posibles contaminantes de aguas subterráneas, mientras que la segunda, a los materiales y residuos peligrosos. En ninguno de estos dos instrumentos se establece clara y directamente un marco legal relacionado con la contaminación de aguas subterráneas derivada de derrames de hidrocarburos, únicamente se hace una interpretación en términos de “alteración de la calidad del agua”. Respecto a lo anterior, conviene mencionar que durante el 2003, la Comisión Nacional del Agua en conjunto con el Congreso de la Unión promovieron un foro de consulta para la integración de una nueva Ley de Aguas Nacionales, la

cual se espera sea oficialmente publicada en los primeros meses del 2004. Esta nueva Ley (LAN, 2004), incorpora nuevos ordenamientos para la prevención y control de la contaminación de las aguas en general y en lo particular adopta el concepto de “Responsabilidad por Daño Ambiental”, tomando como base lo establecido en la LGEEPA en 1996. De esta forma, se establece que la autoridad del agua intervendrá para que se cumpla con la reparación del daño ambiental, incluyendo aquellos daños que comprometan a ecosistemas vitales. De tal forma que las personas físicas o morales que causen la contaminación de un cuerpo de agua asumirán la responsabilidad de reparar el daño ambiental causado, mediante la eliminación de los contaminantes y la restitución de las condiciones que prevalecían antes de producirse el daño, y cuando no fuere posible, mediante el pago de una indemnización fijada en términos de la Ley. Al considerar los problemas de contaminación del agua como un delito ambiental, la Federación tendrá atribuciones para requerir la reparación del daño apoyándose en el Código Penal Federal, bajo el principio de “quien contamina, paga”. Se espera que como parte de una Política Hídrica Nacional los nuevos ordenamientos señalados cubran el vacío en cuanto a la responsabilidad de la sociedad para proteger y, en su caso, se hagan responsables de reparar los daños ambientales provocados al recurso agua. No obstante, es pertinente señalar que las leyes deberán actualizarse a la par del conocimiento y del desarrollo tecnológico en la materia, a fin de asegurar su correcta aplicación y estricta observancia, particularmente en lo que se refiere a los límites permisibles de contaminantes y de restauración.

Por otra parte, el Reglamento correspondiente a la Ley de Aguas Nacionales (publicado en 1994), y el Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos que en su caso apoyaría a la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (publicado en 1988), requieren de una urgente actualización, ya que de poco servirá contar con Leyes actualizadas, si no existen los elementos necesarios para su correcta aplicación.

En cuanto a los instrumentos normativos aplicables, la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 hace referencia a los límites permisibles de calidad de agua para uso y consumo humano. La versión actualizada del año 2000 marca límites máximos permisibles para BTEX como sigue: benceno, 0.010 mg/L; tolueno, 0.700 mg/L; etilbenceno, 0.300 mg/L y xilenos (mezcla de isómeros), 0.500 mg/L. En relación a los hidrocarburos poliaromáticos se puede hacer referencia a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (1989), aunque únicamente considera dos de ellos: acenafteno y fluoranteno, en concentraciones máximas permisibles de 0.02 y 0.04 mg/L, respectivamente. Pero, ni la NOM-127-SSA1-1994 (actualización 2000), ni los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (1989) cubren el amplio espectro de hidrocarburos, además de que ninguno ha sido declarado oficialmente como el marco de referencia que regule específicamente los problemas de contaminación de acuíferos. Lo anterior deja clara la necesidad de

generar los instrumentos normativos necesarios, así como lo relativo a las técnicas de monitoreo y de análisis de laboratorio, sin perder de vista aquellas sustancias que presentan una mayor solubilidad en agua (tabla 1), una mayor incidencia (Saval *et al.*, 2003) o un riesgo a la salud y al ambiente en general.

Adicional a lo anterior, conviene señalar que parte de los vacíos legal y normativo a los que se hizo referencia anteriormente, radica en la estructura organizacional de la Secretaría del ramo, la Semarnat, en la cual la distribución de competencias no se da en función de las particularidades físicas del fenómeno de contaminación, sino en una concepción administrativa que limita la oportunidad de generar un sistema integrado “suelo-agua subterránea” y como consecuencia no permite atender los problemas de una manera integral. De aquí que se hace necesario promover una estructura integrada para tomar acciones coordinadas entre las diferentes dependencias de la propia Semarnat que están involucradas, así como una revisión detallada de la distribución de atribuciones y responsabilidades. Este planteamiento está sustentado en el hecho de que ambos elementos suelo y agua están íntimamente relacionados, por lo que si se logra controlar racionalmente todo lo que ocurre en el suelo se podrán prevenir los efectos negativos que pudieran afectar la calidad del agua subterránea.

PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

Tomando como base lo anterior, el agua subterránea se debe proteger para asegurar que su consumo no presente riesgos a la salud y al medio ambiente en general, y para preservar el recurso a las generaciones futuras, situación que constituye la base de la sustentabilidad.

Prevenir la contaminación de los acuíferos es el mejor camino para reducir los riesgos a la salud asociados al consumo de agua de mala calidad. Es una acción altamente redituable en términos de la relación costo-beneficio, ya que los programas de prevención requieren en general, menos de 5% del costo utilizado para el saneamiento de acuíferos.

La prevención de la contaminación de aguas subterráneas se puede lograr básicamente a través de: i) La aplicación de programas para la protección de acuíferos, ii) la evaluación del impacto de las actividades humanas en el subsuelo y iii) la aplicación de políticas y estrategias de protección de la contaminación.

Los programas de protección del agua subterránea incluyen acciones como:

- Delimitación de áreas de protección alrededor de los pozos de abastecimiento de agua potable, restringiendo la realización de actividades potencialmente contaminantes.
- Desarrollo de planes de contingencia a fin de responder a una emergencia en el suministro de agua, generada por un evento de contaminación.

- Regulación y control en el uso de sustancias tóxicas, así como en la vigilancia de fuentes puntuales de contaminación.
- Desarrollo de un marco normativo en materia de saneamiento de acuíferos contaminados por hidrocarburos o actividades asociadas. Asimismo, la vigilancia periódica en apego a las normas permite controlar el deterioro del recurso.
- Protección de zonas de recarga las cuales deberán estar sujetas a un estricto control del uso del suelo o veda, para evitar que la construcción de obras civiles reduzca la infiltración de la precipitación al subsuelo, o que actividades potencialmente contaminantes lo contaminen.

Una evaluación del impacto del desarrollo económico en los acuíferos es una herramienta de planeación para apoyar la toma de decisiones relacionadas con la protección de fuentes de abastecimiento subterránea. Sus objetivos se pueden resumir como sigue (Biswas, 1992): 1) Identificar los efectos adversos que genera el desarrollo económico de una región en la calidad del agua subterránea; 2) identificar los problemas ambientales que requieren de un tratamiento o estudio a detalle; 3) involucrar a los usuarios en la toma de decisiones relacionadas con el aprovechamiento de las aguas subterráneas; 4) apoyar a todos los sectores vinculados con aprovechamiento de los acuíferos para entender su relación y responsabilidad en la explotación del recurso.

Existen diversas metodologías para evaluar el impacto de las actividades antropogénicas sobre los acuíferos (Foster e Hirata, 1991), éstas varían desde la aplicación de métodos empíricos hasta modelos numéricos. Cada metodología requiere de determinada información, así como de procedimientos de análisis y su aplicación dependerá de la disponibilidad de información técnica, recursos humanos y financieros.

Las políticas y estrategias para la protección de acuíferos tienen como finalidad preservar la calidad natural de las aguas subterráneas, particularmente de aquellas destinadas al uso doméstico. Para ello se requiere de una organización con los recursos y la capacidad técnica y legal para coordinar y aplicar dichas acciones. De acuerdo con Vrba y van Wegeningh (1991) una estrategia permite:

- Establecer el valor del agua subterránea considerando los intereses y las necesidades a nivel nacional y local, así como la de los diferentes usuarios.
- Establecer el marco legal e institucional para la protección de acuíferos.
- Establecer un sistema de control y vigilancia sobre la disposición de contaminantes bajo el principio de que “el que contamina paga”.
- Informar y educar al público en general sobre los programas de protección.

Debido a las características hidrogeológicas de cada región, la aplicación de un programa de protección a un nivel nacional es un ejercicio poco efectivo en términos de administración y control del recurso. Por ello, se recomienda conside-

rar otros criterios como son: el valor del agua y su vulnerabilidad en cada región de interés, así como el volumen disponible del recurso y la demanda actual y futura del agua en la región. Por lo anterior, las políticas de protección para una región deben estar estrechamente vinculadas con las características hidrogeológicas, sociales y económicas de la zona (Vrba, 1991).

BIBLIOGRAFÍA

- Biswas, A., 1992, "Environmental Impact Assessment for Groundwater Management", *International Journal of Water Resources Development*, 8 (2), pp. 113-117.
- "Criterios Ecológicos de Calidad del Agua", 1989, *Diario Oficial de la Federación*, diciembre 2.
- Foster, S.S.D. y R. Hirata, 1991, *Groundwater Pollution Risk Assessment*. Pan American Health Organization, WHO, Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences, Lima, Perú.
- "Ley de Aguas Nacionales", 1992, *Diario Oficial de la Federación*, 01 de diciembre de 1992.
- "Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente", 1996, *Diario Oficial de la Federación*, 28 de enero de 1988; "Decretos de modificación", *Diario Oficial de la Federación*, 13 de diciembre de 1996; 06 de enero del 2000 y 31 de diciembre del 2001; "Reformas", *Diario Oficial de la Federación*, 25 de febrero del 2003.
- NOM-127-SSA1-1994, 2000, "Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización", Modificación, *Diario Oficial de la Federación*, octubre 20, pp. 1-8.
- "Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales", 1994, *Diario Oficial de la Federación*, 12 de enero de 1994.
- "Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos", 1988, *Diario Oficial de la Federación*, noviembre 25.
- Saval S., Ruíz I., García D., Guzmán A.G., Maya L. y Pérez A., 2003, "Hidrocarburos contaminantes de aguas subterráneas", en ponencia presentada en el *IV Congreso Nacional de Aguas Subterráneas*, Asociación Geohidrológica Mexicana A.C., San Luis Potosí, S.L.P., septiembre.
- Vrba J., 1991, *Hydrogeological Aspects of Groundwater Protection and Pollution. Criteria for and Approaches to Water Quality Management in Developing Countries*, Natural Resources Water Series, 26, United Nations, Nueva York.
- Vrba J. y H.G. van Waegeningh, 1991, *Groundwater Protection. Integrated land Use Planning and Groundwater Protection in Rural Areas*, International Hydrological Programme, UNESCO, París.

EL AGUA EN MÉXICO. UNA VISIÓN INSTITUCIONAL

*Felipe I. Arreguín Cortés, Polioptro F. Martínez Austria
y Venancio Trueba López*

EL AGUA EN MÉXICO

Con una superficie de casi dos millones de kilómetros cuadrados, México tiene una precipitación media anual de 772 mm (periodo 1941-2001), la cual equivale a 1528 km³. Sin embargo su distribución espacial es bastante irregular, pues en 42% del territorio, principalmente en el norte, las precipitaciones medias anuales son menores a los 500 mm, y en algunos casos, como en las zonas próximas al río Colorado, son inferiores a 50 mm. Por el contrario en 7% del territorio, existen zonas con precipitaciones medias anuales superiores a los 2000 mm, localizándose regiones donde se registran valores mayores a los 5000 mm. A nivel estatal la precipitación también es muy variable, así en Baja California Sur el valor medio anual es de sólo 175 mm, mientras en Tabasco es de 2426 mm, véase tabla 1. En general estas precipitaciones suceden en unos cuantos meses, 80% de las lluvias se presentan en el verano.

Del agua que se precipita sobre el territorio mexicano, 23% se transforma en escurrimiento superficial, el cual sumado a 48 km³ provenientes de Guatemala, 1.8 km³ del río Colorado y restándole 0.44 km³ que en promedio se entregan a Estados Unidos en el río Bravo, integra el escurrimiento superficial virgen medio de 394 km³, con que cuenta México. Nuevamente la distribución espacial es muy irregular, 50% del escurrimiento superficial se genera en el sureste, en tan sólo 20% del territorio, mientras que en una porción del norte que abarca 30% del territorio se genera sólo 4%.

Otra parte de la lluvia se infiltra, se estima que 75 km³ forman el recurso renovable de los acuíferos, además aquellos que se encuentran bajo las zonas de riego reciben una recarga artificial de 15 km³. Finalmente, se ha calculado que existen alrededor de 110 km³ en los acuíferos que podrían utilizarse por una sola vez. En la figura 1 se presentan los componentes del ciclo hidrológico nacional.

TABLA 1
PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL HISTÓRICA POR ENTIDAD FEDERATIVA^a(1941-2001)

Entidad federativa	Anual	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Aguascalientes	447	12	6	4	8	16	72	98	101	77	32	11	10
Baja California	204	38	33	38	16	4	1	1	5	6	9	21	32
Baja California Sur	175	13	4	2	1	4	1	18	43	55	17	6	14
Campeche	1143	28	21	18	17	62	163	190	203	212	132	60	37
Coahuila	316	12	12	8	19	36	40	33	43	56	31	14	12
Colima	883	20	7	4	2	8	114	164	204	222	101	24	13
Chiapas	1968	78	58	46	57	134	268	271	269	342	232	111	102
Chihuahua	419	16	10	7	8	10	36	108	99	69	28	10	18
D.F.	718	8	5	9	24	51	124	155	146	125	53	11	7
Durango	502	20	9	6	5	11	60	113	115	90	35	13	25
Guanajuato	594	12	6	8	15	37	106	125	125	98	41	11	10
Guerrero	1107	10	3	3	9	49	198	222	220	256	107	24	6
Hidalgo	813	20	18	22	40	66	123	116	112	157	82	36	21
Jalisco	821	14	7	7	7	25	144	203	182	142	61	16	13
México	890	13	6	9	24	62	156	183	176	160	72	20	9
Michoacán	804	13	4	4	10	33	138	185	171	156	65	16	9
Morelos	879	10	3	4	14	55	184	171	167	182	70	14	5
Nayarit	1061	19	9	5	4	8	139	280	275	216	74	15	17
Nuevo León	589	20	17	18	36	60	72	53	86	127	63	20	17
Oaxaca	1522	30	26	22	31	88	254	268	258	292	152	63	38
Puebla	1265	30	26	27	46	83	187	199	195	234	139	63	36
Querétaro	554	11	6	8	20	41	101	106	101	98	42	13	7
Quintana Roo	1256	66	38	31	34	100	175	121	140	209	165	95	82
San Luis Potosí	954	19	17	18	35	67	148	141	150	203	96	36	24
Sinaloa	781	28	13	12	8	10	58	187	195	156	58	23	33
Sonora	426	24	15	10	4	3	20	117	109	57	26	14	27
Tabasco	2426	179	120	80	76	123	244	213	253	384	352	210	192
Tamaulipas	765	19	15	19	36	66	124	101	109	152	77	27	20
Tlaxcala	709	8	6	12	34	74	131	125	129	111	54	17	8
Veracruz	1484	42	34	34	45	78	206	239	205	292	163	88	58
Yucatán	1098	35	33	30	32	79	162	167	165	184	114	52	45
Zacatecas	515	16	8	6	7	19	82	117	112	84	35	13	16
Nacional	772	26	18	15	19	40	103	138	137	141	74	32	29

^a Registro de la Unidad del Servicio Meteorológico Nacional. Datos derivados del análisis de la información de 2117 estaciones climatológicas para 1991-2001.

DISPONIBILIDAD DE AGUA

La disponibilidad media natural de agua anual per cápita también es muy variable en todo el territorio nacional, por ejemplo en la región Valle de México en promedio a cada habitante corresponderían 190 m^3 al año, en tanto que uno de la región Frontera Sur contaría con 25843 m^3 . En promedio cada habitante mexicano dispone de 4685 m^3 al año.

El término disponibilidad media natural refleja la relación entre la oferta natural y la demanda del recurso, y es útil con fines estadísticos comparativos, sin embargo para la administración del agua es necesario adoptar una definición legal que represente la cantidad de agua que puede ser concesionada, una vez descontados los volúmenes ya comprometidos con los usuarios establecidos. Así, el 31 de enero de 2003, se publicó en el *Diario Oficial de la Federación* el 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, lo cual constituyó un paso muy importante dentro del ordenamiento que tiene en proceso la Comisión Nacional del Agua, CNA, encaminado a la gestión integrada de los recursos hídricos de nuestro país. De esta manera a partir del año 2003 el aprovechamiento del agua se hace con base en la disponibilidad real en el país, y en los casos en que existan los estudios de clasificación correspondientes, también se tomará en cuenta la calidad del agua.

Para la determinación de la disponibilidad de agua se utiliza la NOM-011-CNA-2000, que define a la Disponibilidad de Aguas Subterráneas 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”, y a la Disponibilidad de Aguas Superficiales como: el “valor que resulta de la diferencia entre el volumen medio anual de escurrimiento de una cuenca hacia aguas abajo y el volumen anual actual comprometido aguas abajo”. Así definidas, una disponibilidad nula implica que no pueden concesionarse cantidades adicionales de agua.

Los métodos de cálculo se basan en la aplicación de balances de masa a las unidades de gestión (cuencas o acuíferos) o a porciones de ellas. En la figura 2 se presentan los acuíferos cuya disponibilidad fue publicada en el *Diario Oficial de la Federación*, en la tabla 2, las disponibilidades de agua en algunos acuíferos de Chihuahua.

LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA

No sólo la escasez y la mala distribución espacial y temporal del agua imponen limitaciones a su uso, en los últimos años la contaminación se ha manifestado como otro factor restrictivo a la disponibilidad y empleo del agua.

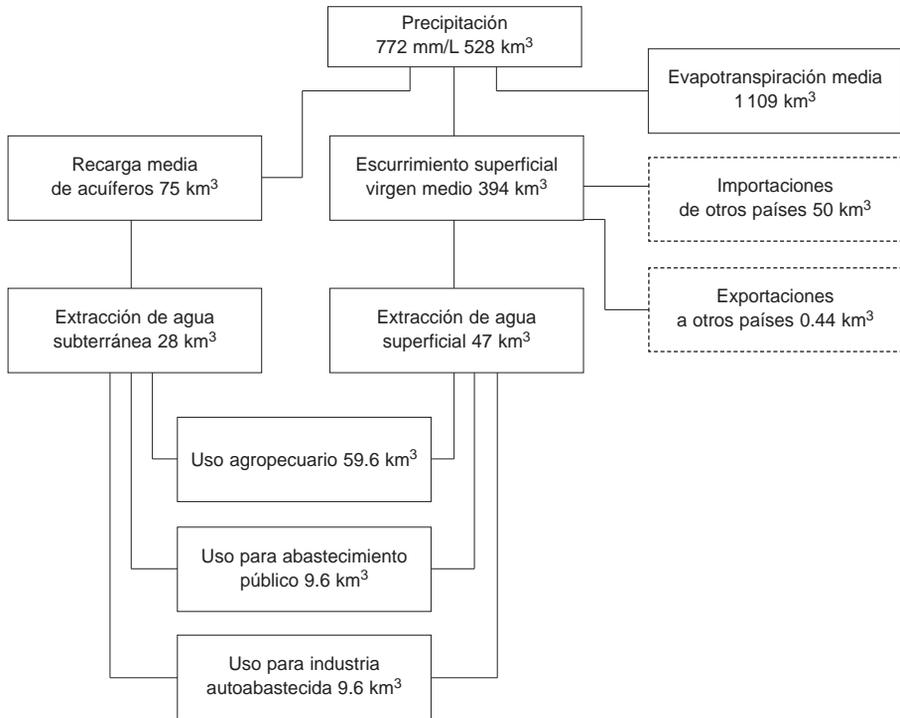


FIGURA 1. Componentes del ciclo hidrológico nacional.

Las ciudades, las industrias, las actividades agropecuarias, la erosión del suelo y otras acciones humanas aportan grandes cantidades de contaminantes a los cuerpos de agua.

La contaminación que produce la industria es altamente variada dependiendo del giro de que se trate. Puede producir contaminantes que tengan efectos tóxicos crónicos, aún cuando los descargue en pequeñas cantidades. Los índices de cadmio, plomo, arsénico y selenio, son altos aguas abajo de las industrias metalúrgicas. Los fenoles que sirven de base para la fabricación de medicamentos, colorantes, explosivos, herbicidas, insecticidas, detergentes, desinfectantes, y que además son auxiliares en la industria textil y del cuero, aparecen cada vez con mayor frecuencia en los monitoreos que se hacen a los ríos y lagos.

La contaminación difusa, o no puntual, producto de los escurrimientos superficiales de las ciudades y de las áreas agrícolas, o la infiltración a los acuíferos de lixiviados de basureros o de agroquímicos agrícolas, pueden causar problemas de más difícil control que la contaminación puntual. En México no se cuenta con información de este tipo de contaminación, los primeros estudios en la cuenca del río Lerma, se encuentran aún en proceso.

El caudal de aguas residuales generadas en México es de $423 \text{ m}^3/\text{s}$, de las cuales $252 \text{ m}^3/\text{s}$ provienen de los municipios y $172 \text{ m}^3/\text{s}$ de la industria. De acuerdo con los estudios de 218 cuencas que cubren 77% del territorio nacional, donde se ubica 93% de la población, 72% de la producción industrial y 98% de la superficie bajo riego, tan sólo en 20 cuencas se genera 90% de la carga contaminante total, medida como DBO.

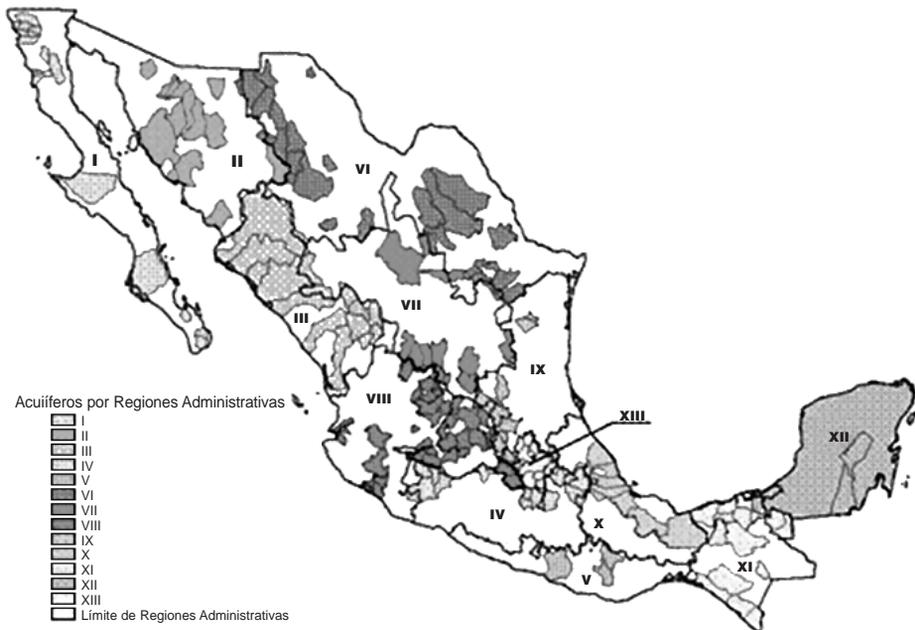


FIGURA 2. Acuíferos cuya disponibilidad fue publicada en el *dof* del 31 de enero de 2003^a. 188 acuíferos de un total de 654.

TABLA 2
DISPONIBILIDAD DE AGUA EN ALGUNOS ACUÍFEROS DEL ESTADO DE CHIHUAHUA

<i>Clave</i>	<i>Unidad hidrogeológica (acuífero)</i>	<i>R</i> <i>Mm³</i>	<i>Dncom</i> <i>Mm³</i>	<i>Vcas</i> <i>Mm³</i>	<i>Vextet</i> <i>Mm³</i>	<i>Das</i> <i>Mm³</i>
0801	Ascensión	132.20	0.000	392.561	192.0	0.000000
0802	Alta Babicora	46.20	5.200	16.8610	34.8	24.13898
0803	Baja Babicora	90.60	0.000	109.248	132.0	0.000000
0804	Buenaventura	66.50	0.000	130.018	86.7	0.000000
0805	Cuauhtémoc	115.20	0.000	293.162	156.7	0.000000
0806	Casas Grandes	180.00	0.000	206.020	200.5	0.000000
0808	Janos	141.90	15.700	160.902	148.0	0.000000
0809	Laguna de Mexicanos	35.10	0.000	14.3781	25.0	20.72189
0810	Samalayuca	16.00	0.000	16.4333	8.5	0.000000
0822	Santa Clara	59.40	35.800	25.5994	26.4	0.000000
0834	Parral-Valle del Verano	26.70	0.000	22.9328	31.5	3.767127
0836	Aldama-San Diego	35.20	12.970	29.7633	20.7	0.000000
0838	Alto río San Pedro	56.30	29.110	9.92431	19.3	17.26568
0857	Escalón	15.70	8.000	5.37540	7.7	2.324591

R: recarga media anual; Dncom: descarga natural comprometida; Vcas: volumen concesionado de agua subterránea; Vextet: volumen de extracción consignado en estudios técnicos; Das: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” y “4” de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000.

En las cuencas de los ríos Pánuco, Lerma, San Juan y Balsas se recibe 50% de las descargas de agua residual, otras cuencas con altos niveles de contaminación son las de los ríos Blanco, Papaloapan, Culiacán y Coatzacoalcos.

Los acuíferos más contaminados se localizan en la Comarca Lagunera, el Valle de México, la región del Bajío y el Valle del Mezquital, y en general los que subyacen las zonas agrícolas. De los estudios de disponibilidad subterránea se ha encontrado que de los 654 acuíferos definidos oficialmente, 97 se encuentran sobreexplotados. Además existen otros 17 acuíferos con problemas de intrusión salina, en la figura 3 se presentan los acuíferos sobreexplotados y con intrusión salina.

LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA

En México existen 4 500 presas, de las cuales 840 están clasificadas como “grandes presas” de acuerdo a la Comisión Internacional de Grandes Presas, Icold, por sus siglas en inglés, la capacidad de almacenamiento de estas obras es de 150 km³. Además existe un número mucho mayor de bordos que sirven de abrevadero o para almacenar agua en pequeñas cantidades.

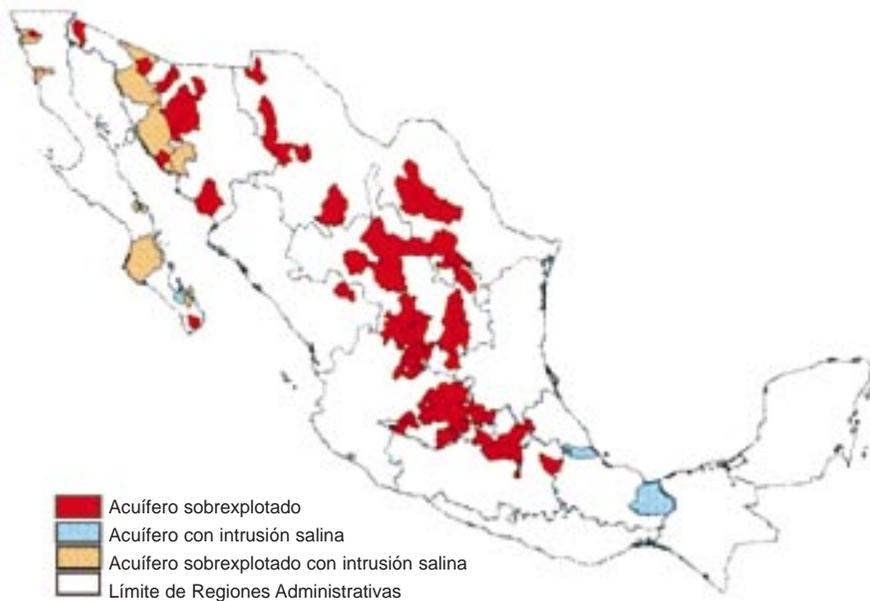


FIGURA 3. Acuíferos sobreexplotados y con intrusión salina.

México cuenta actualmente con 6.3 millones de ha bajo riego, 3.4 millones de ha ubicadas en 82 distritos de riego, 2.9 millones de ha en 39492 unidades de riego, y 2.4 millones de ha en distritos de temporal tecnificado. Es importante hacer notar que en los distritos de riego la eficiencia es de 36.6 y en las unidades de riego de 56.5%.

La cobertura de agua potable en México en el medio urbano es de 94.6%, en el rural de 68%, y a nivel nacional de 87.8%. En tanto que la cobertura de alcantarillado en el medio urbano es de 89.6%, en el rural de 36.7%, y a nivel nacional de 76.2%. La capacidad instalada en plantas potabilizadoras es de 117.8 m^3/s , aunque sólo se tratan 84.9 m^3/s . Con relación al tratamiento de aguas residuales municipales la capacidad instalada es de 80.6 m^3/s y se tratan 50.8 m^3/s . Por otro lado existe una capacidad instalada para tratar aguas residuales industriales de 41.9 m^3/s , y sólo se tratan adecuadamente 25.3 m^3/s .

La desalación de agua para consumo humano e industrial se incrementa día a día en el país, en el año 2001 existía una capacidad instalada de 781 L/s, aunque estaban en operación plantas que trataban sólo 605 L/s. Esta es una opción para algunas regiones donde el agua es escasa, actualmente existen tecnologías que permiten tratar un metro cúbico de agua a un costo menor de \$ 1.00 USD.

Finalmente, en las plantas hidroeléctricas se utilizan (uso no consuntivo) 145080 hm^3 anualmente, mientras que en las plantas de ciclo combinado se emplean

439.6 hm³, 128.6 hm³ en instalaciones geotérmicas, 0.15 hm³ en nucleoelectricas y 3 353.1 hm³ en termoeléctricas.

LOS FENÓMENOS EXTREMOS

Debido a su ubicación geográfica, México está sujeto a la influencia de ciclones y sequías, que ocasionan grandes pérdidas materiales y de vidas. Los primeros suceden año con año, de manera que 36 ciclones en categoría de huracán (H1 a H5) han penetrado en territorio nacional en el periodo 1980-2001, en tanto que las sequías se presentan con una periodicidad de una vez cada diez años.

EL REÚSO DEL AGUA

Actualmente las aguas residuales municipales se reúsan en regiones con poca disponibilidad de agua, aún cuando en la mayoría de los casos se hace en forma inapropiada. Las aguas residuales de la Ciudad de México se utilizan en la agricultura en los Distritos de Riego 03 y 100 en el estado de Hidalgo, en Chalco y Chiconautla, Estado de México, también se usan en Valsequillo, Pue., Tulancingo, Hgo., y Ciudad Juárez, Chih., entre otros.

En la industria, se usan aguas residuales tratadas en algunas papeleras. En Lechería, Mex. y en Tula, Hgo., se emplean para enfriar los sistemas de generación de energía eléctrica. En recreación se han utilizado aguas residuales tratadas en el llenado de lagos como el de Chapultepec, San Juan de Aragón y Xochimilco, entre otros. Además se usan para el riego de áreas verdes. Actualmente se reúsan 71 m³/s en el medio agrícola, 5 m³/s en el municipal y 2 m³/s en el industrial.

El reúso industrial de las aguas residuales municipales es aún muy restringido, se identifican actualmente sólo dos tipos de práctica. Una de ellas corresponde a plantas industriales que se abastecen directamente del alcantarillado, y ellas mismas se encargan del tratamiento para cumplir con sus requerimientos de calidad. En este caso están las termoeléctricas del Valle de México y Tula de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la refinería de Pemex en Tula y Altos Hornos de México, en Monclova. La termoeléctrica de Tula, por ejemplo, cuenta con una planta que trata de 850 a 1300 L/s de agua residual del Gran Canal para emplearla en enfriamiento. La otra práctica es el tratamiento y suministro de agua tratada a un reducido grupo de empresas, algunas de ellas localizadas en la ciudad de Monterrey, y otras en la zona metropolitana del Valle de México.

ORGANISMOS DE PARTICIPACIÓN

La Ley de Aguas Nacionales establece la creación de instancias de coordinación y concertación entre la CNA, las dependencias, los tres niveles de gobierno y los representantes de los usuarios de la cuenca hidrológica, con el objeto de 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. A la fecha se han instalado 26 Consejos de Cuenca. Para su funcionamiento estos consejos pueden contar con organizaciones auxiliares, destacan entre ellos los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (Cotas), de los cuales se encuentran constituidos a la fecha 57, y los Comités Playas Limpias.

EL FUTURO DEL AGUA

En México la autoridad del agua es la Comisión Nacional del Agua, y es esta institución la encargada de hacer la prospectiva del agua, que tiene como propósito estimar y proponer lineamientos y acciones para responder ante diferentes escenarios de demanda. Estos han sido planteados a partir del marco de referencia presentado en la figura 1, considerando a los grandes usuarios del agua: agricultura, doméstico e industrial.

Con las anteriores consideraciones se plantearon varios escenarios, en la tabla 3, se presentan tres de ellos (elaborados con información del año 2001). Para el caso del agua potable, el escenario de la situación actual considera que la cobertura para zonas urbanas es de 95.25% y para zonas rurales de 65.59%, y permanece constante; en el escenario tendencial las coberturas permanecen iguales, y en el escenario sustentable ambas se incrementan a 97%. Se considera que la eficiencia física en los dos primeros escenarios se mantiene en 56.58%, y en el escenario sustentable se incrementaría a 76%.

En el caso del riego, en el escenario tendencial se abrirían a la actividad 150 000 nuevas hectáreas, y en el sustentable 419 175. Además se supone un incremento de la eficiencia en los distritos de riego, en los dos últimos escenarios a 48.98 y 63.09% respectivamente.

Para la industria se considera que la actual participación del Producto Interno Bruto de México que es de 22%, se mantiene igual en el escenario tendencial y se incrementaría a 34% en el escenario sustentable.

En el escenario tendencial se plantea incrementar la eficiencia en el uso del agua reduciendo los desperdicios. Con ello sube la cobertura de servicios, se reducen las pérdidas, se aumenta la eficiencia y se reduce la demanda.

LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

La Comisión Nacional del Agua, autoridad en la materia, considerando la problemática del país ha establecido como su misión: *Administrar y preservar las aguas nacionales, con la participación de la sociedad, para lograr el uso sustentable del agua.*

Por otro lado la visión de la CNA es: *Ser un órgano normativo, de excelencia técnica y promotor de la participación de la sociedad y los usuarios organizados en la administración del agua.*

Para alcanzar esta visión se han planteado seis objetivos:

1. Fomentar el uso eficiente del agua en la producción agrícola.
2. Fomentar la ampliación de la cobertura y calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
3. Lograr el manejo integral y sustentable del agua en cuencas y acuíferos.

TABLA 3
ESCENARIOS (METAS AL 2025) PLANTEADOS POR
LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. CNA, 2001

<i>Meta</i>	<i>Situación actual</i>	<i>Escenario tendencial</i>	<i>Escenario sustentable</i>
<i>Público-Urbano</i>			
Cobertura agua potable (%)	87.70%	87.70%	97.00%
Cobertura agua potable rural (%)	65.59%	65.59%	97.00%
Cobertura agua potable urbana (%)	95.25%	95.25%	97.00%
Cobertura alcantarillado (%)	73.70%	73.70%	97.00%
Cobertura alcantarillado rural (%)	33.65%	60.00%	97.00%
Cobertura alcantarillado urbano (%)	87.22%	87.22%	97.00%
Eficiencia física (%)	56.58%	56.58%	76.00%
Saneamiento municipal (%)	21.50%	60.00%	90.00%
Dotación (lt/hab/día)	266.2	266.2	198.1
<i>Industria</i>			
Cobertura de tratamiento (%)	60.00%	60.00%	83.00%
Participación en el PIB (%)	22.00%	22.00%	34.00%
Crecimiento del PIB (%)		2.80%	5.10%
<i>Agrícola</i>			
Nuevas áreas al riego (ha)	—	150 000	419 175
Incorporación áreas ociosas (ha)	—	338 000	475 825
Modernización áreas de riego (ha)		1 120 000	5 758 931
Riego suplementario			105 000
Eficiencia global (%)	46.57%	48.98%	63.09%
Eficiencia en distritos de riego (%)	37.62%	43.09%	55.34%
Eficiencia en unidades de riego (%)	55.34%	55.89%	73.66%
Desarrollo de temporal tecnificado (ha)			600 386

¹ Incluye 800,000 hectáreas modernizadas al año 2000

Fuente: Subdirección General de Programación

4. Promover el desarrollo técnico, administrativo y financiero del sector hidráulico.
5. Consolidar la participación de los usuarios y la sociedad organizada en el manejo del agua y promover la cultura de su buen uso.
6. Disminuir los riesgos y atender los efectos de inundaciones y sequías.

EL PROGRAMA DE MODERNIZACIÓN DEL MANEJO DEL AGUA EN MÉXICO

El Programa de Modernización del Manejo del Agua (Promma) de México fue concebido en 1994. Tiene como objetivo principal apoyar al Gobierno de México a cumplir con los objetivos de la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, que entraron en vigor en diciembre de 1992 y en enero de 1994, respectivamente. La implementación efectiva del Promma se inició en marzo de 1997, y continúa hasta la fecha.

Situación que originó el Promma

Desde 1990 en que el enfoque sobre los recursos hídricos sufrió cambios sustantivos en el ámbito mundial, las acciones que se han venido realizando en México, están permitiendo avanzar en materia de manejo integrado del agua. Sin embargo, el panorama aún imperante en 1994, mostraba que era necesario incorporar e impulsar la utilización de tecnología moderna.

Descripción y objetivos

El objetivo central del Promma es: “Contribuir a establecer y consolidar la capacidad tecnológica que requiere México para el desarrollo y manejo integrado de sus recursos hídricos”, lo cual implica el diseño, desarrollo y establecimiento de políticas públicas de carácter intersectorial, que permitan responder a las demandas crecientes de volúmenes de agua dentro de un entorno de recursos hídricos limitados, finitos, e incluso escasos. Los objetivos secundarios del Promma son los siguientes:

- Promover e impulsar acciones que conduzcan a la protección, preservación y regeneración de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, en cantidad y calidad suficientes para permitir el desarrollo equilibrado, intersectorial, sostenible y armonioso de los diferentes usos del agua, y establecer condiciones que inspiren el desarrollo económico, social, cultural y de protección contra los desastres naturales, basado en la convivencia responsable entre la sociedad y el medio ambiente, a nivel de cuencas hidrográficas.
- Proveer datos, información y productos relacionados, confiables y oportunos, con la modernización y operación sostenible de redes de monitoreo del ciclo hidrológico, así como de herramientas para la evaluación, aplicación y utili-

zación de las variables actuantes; fortalecer los procesos de planeación y administración de los recursos hídricos; y vigorizar e impulsar la organización de los usuarios y actores del agua, en un marco intersectorial, a través de la creación y consolidación de los Consejos de Cuenca y sus órganos auxiliares.

- Fortalecer la capacidad institucional: técnica, administrativa y jurídica, de la CNA, de los Consejos de Cuenca y sus organismos auxiliares, y de otros actores del agua tales como Comisiones Estatales de Agua, Organismos Operadores y Concesionarios de Servicios.

Para alcanzar los objetivos fijados, el Promma contempla actividades que se agrupan en 6 componentes y 24 subcomponentes, con más de 100 actividades. Los componentes se describen a continuación.

DESARROLLO INSTITUCIONAL, APOYO TECNOLÓGICO Y CAPACITACIÓN

Este componente ha permitido impulsar el desarrollo institucional de la CNA y de la organización social a través de los Consejos de Cuenca y sus órganos auxiliares. En el tiempo de su implementación, se han llevado a efecto diversos programas de capacitación y asistencia técnica orientados a la formación de especialistas de la CNA en instalación, operación, verificación y mantenimiento de redes de monitoreo y medición hidrométrica, climatológica y meteorológica, de aguas subterráneas y de las redes primaria, secundaria y costera de la calidad del agua, sobre operación de laboratorios de calidad del agua, también en temas de informática y telecomunicaciones, manejo y operación de bancos de datos, instalación, operación y mantenimiento de sistemas de telecomunicaciones, manejo de información georreferenciada, operación y manejo de presas y acuíferos, programas de comunicación y participación ciudadana, y organización y manejo de programas de emergencia. También se han efectuado actividades de capacitación en administración del agua, como cursos sobre legislación y normatividad hidráulica, así como capacitación especializada sobre modelos hidráulicos, hidrométricos e hidroeconómicos.

MODERNIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN Y MANEJO DE DATOS E INFORMACIÓN DE CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA Y ESTUDIOS

Este componente tiene como objetivo modernizar y mejorar los medios para la obtención y procesamiento de la información del agua. En este sentido, se ha avanzado en el rediseño de las redes de monitoreo de la meteorología, climatología, hidrometría, las aguas subterráneas y la calidad del agua, así como el me-

joramiento y modernización de los laboratorios de calidad del agua y de los sistemas y equipos para el procesamiento de los datos y la información. Ello permite hoy contar con mejores elementos de apoyo para la evaluación y clasificación de cuerpos de aguas superficiales y subterráneas, la elaboración de balances hídricos en cantidad y calidad y la realización de estudios hidrológicos e hidrogeológicos por cuencas y regiones.

Un logro muy importante y de gran impacto para la regulación y mejor uso del agua en México, lo constituye sin ninguna duda el haber logrado iniciar la publicación de las disponibilidades de las aguas subterráneas y las aguas superficiales, en cumplimiento de la Ley de Aguas Nacionales.

La vigilancia de la atmósfera y del comportamiento hidrológico de los ríos y embalses se realiza ahora con un importante reforzamiento de datos e información, en muchos casos obtenida en tiempo real. Esto, aunado a la capacitación del personal que realiza la medición, la interpretación y aplicación de los datos medidos con nuevos y modernos instrumentos, está permitiendo mejorar los tiempos y calidad de la respuesta de la CNA, en particular como parte del Sistema de Protección Civil, para la prevención, el alertamiento y la protección de la población ante la presencia de fenómenos hidrometeorológicos severos, donde el mayor impacto es sin ninguna duda evitar la pérdida de vidas humanas.

MODERNIZACIÓN DE LA OPERACIÓN, SEGURIDAD DE PRESAS Y DEL MANEJO DE ACUÍFEROS

Este componente busca apoyar los criterios, acciones y procedimientos para lograr: (i) la eficiente operación de presas con el objetivo de maximizar los beneficios de la infraestructura hidráulica existente; (ii) la seguridad de las presas, con el fin de lograr su correcta operación y mitigar daños y catástrofes; y (iii) un manejo racional de los acuíferos para asegurar la sustentabilidad en su aprovechamiento.

Esto aunado a la capacitación del personal que realiza la medición, la interpretación y aplicación de los datos medidos con nuevos y modernos instrumentos, y los análisis y pronósticos efectuados con mejores técnicas está permitiendo mejorar los tiempos y calidad de la respuesta de la CNA, en particular como parte del Sistema de Protección Civil, para la prevención, el alertamiento y la protección de la población ante la presencia de fenómenos hidrometeorológicos severos, donde el mayor impacto es sin ninguna duda evitar la pérdida de vidas humanas.

Operación de embalses. Se ha logrado un avance importante en la implementación de este subcomponente, con asistencia del National Weather Service (NWS) de

Estados Unidos, en lo que se refiere al establecimiento del Centro Regional de Pronóstico Hidrológico (CRPH) Río Bravo en Monterrey, incluyendo la consolidación del CRPH del Noroeste en Hermosillo, el fortalecimiento del Centro Nacional de Pronóstico Hidrológico (Gasir), y la inicialización del CNPH Golfo Norte, con los sistemas de pronóstico de escurrimiento en ríos (Sper) para las cuencas de los ríos Fuerte, Yaqui, Bravo y Pánuco, al avance en el desarrollo de un sistema de bases de datos e intercambio de información entre los CRPH y el CNPH de la Gasir y con el West Gulf River Forecast Center (WGRFC) del NWS para la cuenca del río Bravo, al progreso en la preparación de un sistema de mapeo de inundaciones para el Pánuco.

Seguridad de Presas. El establecimiento del Programa Nacional de Seguridad de Presas (PNSP) constituye un importante avance en este subcomponente. Una serie de procesos, criterios técnicos y de delimitación de responsabilidad ha sido establecida en las áreas del registro nacional de presas, de inspección, de seguimiento y de capacitación.

Se están reactivando las redes de monitoreo de las aguas subterráneas y realizando los modelos de simulación hidrodinámica de numerosos acuíferos sobreexplotados. Esto permite racionalizar las concesiones del uso de las aguas nacionales por una parte, y por otra, plantear claramente la gravísima situación de sobreexplotación en que se encuentran numerosos acuíferos, incluyendo los más importantes del país. Esto mismo dio origen al planteamiento del sexto componente del Promma de *Manejo sostenible del agua subterránea*.

La incorporación de esta información hidrogeológica a las mallas de datos de los modelos de flujo de aguas subterráneas es dirigida por consultores quienes reciben retroalimentación de los hidrólogos de la GAS durante el diseño, construcción y calibración de los modelos. Actualmente, se dispone de modelos de flujo de agua subterránea para simular 48 de los acuíferos más sobreexplotados.

ADMINISTRACIÓN DEL USO DEL AGUA

El objetivo de este componente es proporcionar elementos de apoyo que permitan consolidar la estructura institucional de la CNA para el ejercicio de la autoridad en la administración del vital líquido, mediante el perfeccionamiento de los instrumentos regulatorios y económicos previstos en la Ley de Aguas Nacionales. Para ello el Programa contempla acciones dirigidas a fortalecer el desarrollo e implementación de procedimientos para la identificación, categorización y registro de usuarios, así como el desarrollo de programas para apoyar a los usuarios del agua y promover su registro. En este sentido se contempla el mejora-

miento de los sistemas computacionales para la actualización continua del registro de recaudación, y la elaboración de manuales y procedimientos para la adecuada administración del uso del agua.

PLANEACIÓN, CONSEJOS DE CUENCA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN EN EL ÁMBITO DEL AGUA

El objetivo principal de este componente es la implementación, en la CNA, del proceso y de la capacidad institucional y tecnológica para la planeación, el manejo y la administración de los recursos hidráulicos a nivel nacional, regional y de cuenca. La planeación de los recursos hídricos estará sustentada por los sistemas de información adecuados, para lo cual se contempla el mejoramiento de los sistemas de telecomunicaciones y cómputo y de los sistemas geográficos de información. En la cuenca, la creación y consolidación de consejos de cuenca serán el objetivo esencial.

En 1995 sólo existía el Consejo de Cuenca Lerma-Chapala. Con su impulso, el Promma ha contribuido a crear y avanzar en el proceso de consolidación de 25 Consejos de Cuenca, más de 50 Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (Cotas), y varios comités y comisiones de cuenca propia. Este proceso sin duda está contribuyendo de manera tangible a modernizar y mejorar el manejo del agua en México. Asimismo, esta política, que considera a la cuenca, subcuenca o acuífero como la unidad geográfica para el manejo del agua, contribuyó y continúa apoyando de manera importante, y en coordinación con la Gerencia de Consejos de Cuenca, al proceso de planeación y manejo del agua participativos en el seno de los Consejos de Cuenca y sus órganos auxiliares. El Sistema de Información Geográfica del Agua que surgió con el Promma, ha continuado avanzando para brindar el mayor apoyo posible a todas las regiones.

Establecimiento y Consolidación de Consejos de Cuenca. En un periodo extremadamente corto, se ha logrado un considerable avance en la estrategia de descentralización del manejo del agua, con el establecimiento y funcionamiento de 25 Consejos de Cuenca (CC), 10 de ellos instalados durante el año 2000, así como en el establecimiento de órganos auxiliares de los CC: de los cuales ya se tienen actualmente 6 Comisiones y 3 Comités de Cuenca, y 38 Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (Cotas), de los cuales se instalaron 8 en el año 2000. Para promover una participación efectiva de los usuarios y demás interesados en la formulación, seguimiento y actualización de la planeación y programación hidráulica de las cuencas del país, la CNA ha realizado centenares de reuniones de coordinación y concertación, efectuadas en 74 distintas ciudades. Con publicaciones conjuntas de la CNA y de los gobiernos de los Estados interesados, se es-

tá utilizando plenamente la planeación hidráulica regional como instrumento de concertación y de consenso. El avance en la descentralización del manejo del agua ha sido excepcional. Queda por profundizarla. En efecto, entre otros aspectos, se hace necesario avanzar más en la participación plena de los diversos actores en los diferentes niveles de los procesos de toma de decisiones y acción que les corresponda, dotando a los CC y sus órganos auxiliares del brazo ejecutivo y de los medios financieros derivados directamente de los derechos de uso y de descarga.

MANEJO SOSTENIBLE DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Este componente (*proyectos piloto de estabilización de acuíferos sobreexplotados*) se añadió a raíz de la reprogramación de febrero de 1999, y su objetivo principal es establecer políticas de *manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos en la zona de influencia de acuíferos sobreexplotados*, cuyas estrategias y acciones contribuyan al bienestar social, al crecimiento económico y a la preservación del medio ambiente. Entre sus acciones, cabe mencionar a las siguientes: (a) iniciar el desarrollo de planes de manejo integrado y sostenible del agua en la zona de influencia de acuíferos sobreexplotados, con la plena participación de los Cotas y dentro de un contexto intersectorial; (b) diseñar e implementar instrumentos y mecanismos de coordinación y concertación para la solución de conflictos; y (c) establecer casos de acuíferos piloto (al menos 5), para el desarrollo y aplicación del manejo integrado y sostenible del agua.

Perspectivas

Las evaluaciones anuales del Promma han mostrado que el Programa, después de un inicio relativamente lento, ha adquirido un nuevo ímpetu en su implementación a partir de 1998. Con la reprogramación que se efectuó al inicio de 1999, fijando metas más realistas al Programa, y a pesar de los persistentes problemas de limitación en recursos humanos y financieros que afectan a la mayoría de las Gerencias de la CNA, los cuales están fuera del control del Promma, los avances y los logros ya conseguidos permiten esperar que el Programa conseguirá cumplir sus objetivos principales cuando se complete su implementación en 2004.

El enfoque original del Promma según se concibió a mediados de la década del 90 sigue siendo válido para ayudar a la CNA hacia el manejo integrado de los recursos hidráulicos para el desarrollo sostenible de México. Sucesos recientes, como la sequía en la región noroeste del país y las inundaciones en los estados del centro y sur durante 1999 y 2003, enfatizan todavía más los beneficios sociales, económicos y ambientales que a final de cuentas se obtendrán a partir de los nuevos enfoques para la evaluación y manejo del recurso agua contem-

plados dentro de los objetivos del Promma. Estos objetivos se encuadran dentro de una visión a corto, mediano y largo plazos de la problemática del agua en el siglo que comienza. Ante los retos que plantea la problemática del agua en México para el siglo XXI, el Promma, como instrumento estratégico, ha tenido la oportunidad y el privilegio de contribuir a la dinámica del cambio en el manejo del agua en México —tarea aún en proceso—, y acompañaría al país en su vocación de modernización para alcanzar un manejo integrado y sustentable del agua, a fin de asegurar la durabilidad de sus recursos hídricos, evitando que éstos sean un factor limitante del desarrollo, sino por el contrario, logrando que el manejo del agua contribuya al desarrollo sostenible de México, del cual depende la viabilidad de la Nación a largo plazo.

La tecnología y el desarrollo científico en el Sector Hidráulico

En el caso del agua, una acción muy importante realizada por el gobierno en materia de investigación y desarrollo tecnológico fue la creación, en 1986, del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA. Por primera vez en la historia de nuestro país, se contaba con una institución gubernamental especializada y dedicada a estas actividades que junto con las universidades e institutos se abocarían al problema del agua. El IMTA tiene como misión realizar investigación, desarrollar, adaptar y transferir tecnología, formar recursos humanos calificados y prestar servicios tecnológicos para el manejo, la preservación y la rehabilitación del agua y su entorno, a fin de contribuir al desarrollo sustentable del país.

Cuando fue creado, el IMTA formaba parte de la extinta Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. En 1986 pasó a formar parte de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, hoy Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). El 31 de octubre de 2001, el IMTA se constituyó como organismo público descentralizado, con personalidad jurídica y patrimonio propios. A continuación se enlistan algunos de los logros del IMTA:

- Desarrollo y transferencia de tecnología de medición en sistemas urbanos y de riego
- Desarrollo y transferencia de tecnología de bajo costo para desinfección solar del agua
- Desarrollo y transferencia de tecnología de bajo costo para eliminación de fierro y manganeso en fuentes de agua
- Desarrollo de métodos biológicos para el control de malezas acuáticas
- Desarrollo de un protocolo para eliminar fugas en sistemas de agua potable
- Modelos de simulación de inundaciones
- Desarrollo de una metodología para la simulación de escalas grandes en acuíferos
- Desarrollo de técnicas eficientes de riego

- Desarrollo de un modelo de mesoescala para pronóstico meteorológico en México
- Desarrollo de modelos dinámicos para las cuencas Lerma-Chapala, Bravo y Valle de México
- Publicación de la revista *Ingeniería Hidráulica en México*, incluida en 17 índices internacionales, entre los que destaca el *Science Citation Index* y el índice de revistas de excelencia de Conacyt.

Hasta el año 2001 el Instituto operó como órgano desconcentrado de la Semarnat y sus recursos autogenerados correspondieron en su totalidad a transferencias presupuestales provenientes de la CNA, para cubrir los costos asociados con los convenios que se suscribían con la propia Comisión. Al cierre del ejercicio 2001, se tuvieron ingresos por ese concepto que ascendieron a un monto de 64.6 millones de pesos. En el año 2002 los ingresos sumaron 79.3 millones de pesos, lo cual implicó un incremento de 22.7% con respecto al monto del año anterior, y para 2003 el ejercicio es de 98.8 millones de pesos.

Tradicionalmente, cuando se analizan las prioridades en investigación, se acostumbra que los propios investigadores propongan las líneas de trabajo que consideren más apropiadas. Se pretende elegir las que, a juicio de éstos, tienen las mejores oportunidades de generar nuevos conocimientos o innovaciones. Este procedimiento, tiene importantes desventajas, la primera de ellas el inevitable sesgo que los intereses y especialidad del investigador imprimen. Otra limitación es que, usualmente, los investigadores no están interesados de manera directa en el valor agregado que sus innovaciones puedan producir, y por lo tanto con frecuencia ignoran cuáles son los principales puntos donde la tecnología puede representar una ventaja competitiva para los posibles usuarios de sus desarrollos. Con demasiada frecuencia, el resultado de esta estrategia de selección de líneas de investigación, es que muchos de los resultados, que pueden ser valiosos por sí mismos, no producen verdaderas innovaciones —es decir nuevas tecnologías en uso en la realidad cotidiana. Por ello, el Gobierno tiene la intención de trabajar en forma más coordinada con el sector de la investigación, de manera que ellos conozcan las necesidades del país y a su vez, el gobierno haga uso de sus resultados y desarrollos tecnológicos.

Una revisión de los objetivos nacionales hidráulicos y de sus estrategias, muestra que las principales líneas de desarrollo tecnológico y de investigación aplicada deben estar orientadas a contribuir al logro de los siguientes objetivos estratégicos:

1. Incrementar la eficiencia en el uso del agua, tanto en el uso agrícola como en el uso urbano. En el primero, mejorando su productividad, es decir proporcionando valor agregado a los productores del campo.

2. Modernizar y tecnificar los sistemas hidráulicos, ya sean los rurales, agrícolas, industriales y urbanos, asegurando un menor uso —disminuir la demanda per capita— y una mayor productividad del agua.
3. Mejorar el conocimiento del agua y los recursos naturales asociados, mediante redes de medición y monitoreo tanto de la cantidad como de la calidad.
4. Mejorar las capacidades de los operadores y administradores de los sistemas hidráulicos, sean estos los del medio rural, agrícola (asociaciones de usuarios de riego) o urbano (organismos operadores de sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento).
5. Disminuir la sobreexplotación de los recursos hidráulicos.
6. Promover el reúso del agua.
7. Mejorar el manejo, análisis y conocimiento social de la información del agua.
8. Capacitar y mantener actualizados a los operadores de los sistemas hidráulicos de todo tipo, y en especial a los de riego y de uso urbano.
9. Promover la gestión integrada de los recursos hidráulicos.

Con estas líneas y los criterios antes enunciados, es de esperar que los escasos recursos económicos, humanos y tecnológicos disponibles en el sector, sean mejor aplicados y se produzcan resultados de relevancia en su desarrollo tecnológico, como un medio para alcanzar los objetivos nacionales en materia de agua.

REFERENCIAS

- Arreguín, E., 1991, “Uso eficiente del agua”, *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, mayo-agosto, pp. 9-22.
- Arreguín, E., 1997a, “Conferencia magistral del Premio Enzo Levi. Uso eficiente del agua y la tecnología”, *Tláloc, AMH*, 9, enero, pp. 8-10.
- Arreguín, E., 1997b, “El uso eficiente del agua y la tecnología”, *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, 12 (1), enero-abril, pp. 91-98.
- Banco Mundial, 1994, *La ordenación de los recursos hídricos*, Documento de política Banco Mundial. Washington.
- Banco Mundial, 1996, *The World Bank. Staff Appraisal Report. México. Water Resources Management Project*, Report No. 15435-ME, mayo 31, México.
- Canales, E., 2000, *Desarrollo de ventajas competitivas. Curso Administración efectiva de los centros de investigación y desarrollo tecnológico*, HADITA, Cuernavaca, Mor., septiembre.
- CNA, 2000,
- CNA, 2001, *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*, Comisión Nacional del Agua, México.

- CNA, 2002, *Informe OMM/Promma, No. 112, Proyecto de Manejo Integrado y Sostenible del Agua en el Valle de Aguascalientes*, Comisión Nacional del Agua y Organización Meteorológica Mundial (OMM), México, junio.
- CNA, 2003, *Estadísticas del Agua en México*, Comisión Nacional del Agua, México.
- Martínez Austria, P., A. Muñoz Mendoza y R. Flores Berrones, 2000, *Síntesis y conclusiones del Foro Nacional "Los Retos de la Ingeniería en el siglo XXI"*, Academia Nacional de Ingeniería, México.

ADMINISTRACIÓN DE DERECHOS DE AGUA. DE REGULARIZACIÓN A EJE DE LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Mario A. Cantú S. y Héctor Garduño V.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad per capita promedio de agua en México es de unos 5 000 m³/año, cifra que supera por mucho el umbral internacional de 1 000 m³ con el que se suele ubicar la escasez. Sin embargo, los grandes demandantes del agua se encuentran ubicados en el norte y centro del país, donde el recurso es escaso, pero se concentra 77% de la población y se genera 84% del Producto Interno Bruto (PIB). Por su parte, en el sureste en donde existe agua en abundancia, vive sólo 23% de la población nacional y se genera apenas 16% del PIB. A la variabilidad espacial de la disponibilidad se suma la temporal ya que 67% de la precipitación ocurre durante los meses de junio a septiembre. El número de conflictos por el uso del agua superficial en las zonas áridas y semiáridas del país ha ido en aumento. Lo mismo sucede con el agua subterránea, cuya importancia resulta evidente si se considera que abastece a 70% de la población, la tercera parte de la superficie bajo riego y 50% de la industria. La fragilidad de este recurso se pone de manifiesto por el hecho de que, de los 654 acuíferos identificados en el país, 97 están sobreexplotados, es decir que durante muchos años se han extraído volúmenes mayores a la recarga natural.

Si se considera que transportar agua a grandes distancias es sumamente costoso, en la práctica no es económicamente factible aminorar la asimetría existente entre la oferta y la demanda del recurso en el norte y centro del país, lo que origina la existencia de mercados de agua localizados regionalmente. De esta manera, los problemas de agua en una cuenca tienen que ser resueltos en su ámbito geográfico. El primer paso para abordar tales problemas es conocer quién usa cuánta agua y en dónde; el segundo que los usuarios tengan seguridad jurídica en cuanto a los caudales que pueden utilizar. En 1992 se estimaba que había aproximadamente 300 000 usuarios. Sin embargo, previo a este año apenas se habían emitido 2 000 títulos de concesión. La Ley de Aguas Nacionales (LAN), apro-

bada por el Congreso de la Unión en diciembre de 1992, ordenó regularizar la situación de todos los usuarios en un plazo de un año; mientras que su reglamento (expedido 13 meses después) otorgó dos años adicionales para ciertos tipos de usos.

A la fecha se han expedido aproximadamente 330 000 títulos de concesión de aguas nacionales de los cuales 47% corresponde al uso agropecuario, 36% al uso público urbano, 1.3% al uso industrial, y 9.5% a usos múltiples.

La situación de escasez en muchas regiones del país se agrava por la contaminación del agua y en zonas de aparente abundancia la disponibilidad efectiva se reduce por la misma razón. Una de las principales causas de tal contaminación es el gran número de efluentes sin tratamiento provenientes de descargas de aguas residuales municipales, y de industrias, de comercios y de servicios.

ASPECTOS JURÍDICOS E INSTITUCIONALES

i. Fundamentos Legales del Sistema de Administración de Derechos de Agua

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos desde 1917 reconoce a la nación como propietaria del agua y autoriza al Ejecutivo Federal a administrar estos recursos y a otorgar concesiones para usar el agua. 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 (CNA) para formular, implantar y evaluar la planeación hidráulica del país, administrar y custodiar las aguas nacionales, expedir títulos de concesión¹ y otorgar permisos de descarga de aguas residuales en cuerpos de agua de propiedad nacional, así como sus prórrogas y transmisiones, y proyectos de reglamentos de cuencas. La LAN también define a la CNA como “la autoridad federal única en materia de agua del país”.

El consenso internacional de que “la administración del agua debe basarse en una combinación equilibrada de *instrumentos económicos, de orden y control, regulatorios y participativos*” se refleja claramente en las leyes que constituyen la legislación mexicana de aguas (figura 1). Esta legislación está constituida principalmente por la LAN y las partes de la Ley Federal de Derechos (LFD) relacionadas con el agua, en donde se establece el pago por uso de aguas nacionales, así como por el uso o aprovechamiento de bienes del dominio público de la nación como cuerpos receptores de descargas de aguas residuales.²

¹ La LAN distingue entre las concesiones que se otorgan a las personas y organismos particulares y las asignaciones, que se otorgan a las entidades de la administración pública. En este trabajo ambas se denominan concesiones.

² En adelante se denominará como “pago por descarga de aguas residuales”.

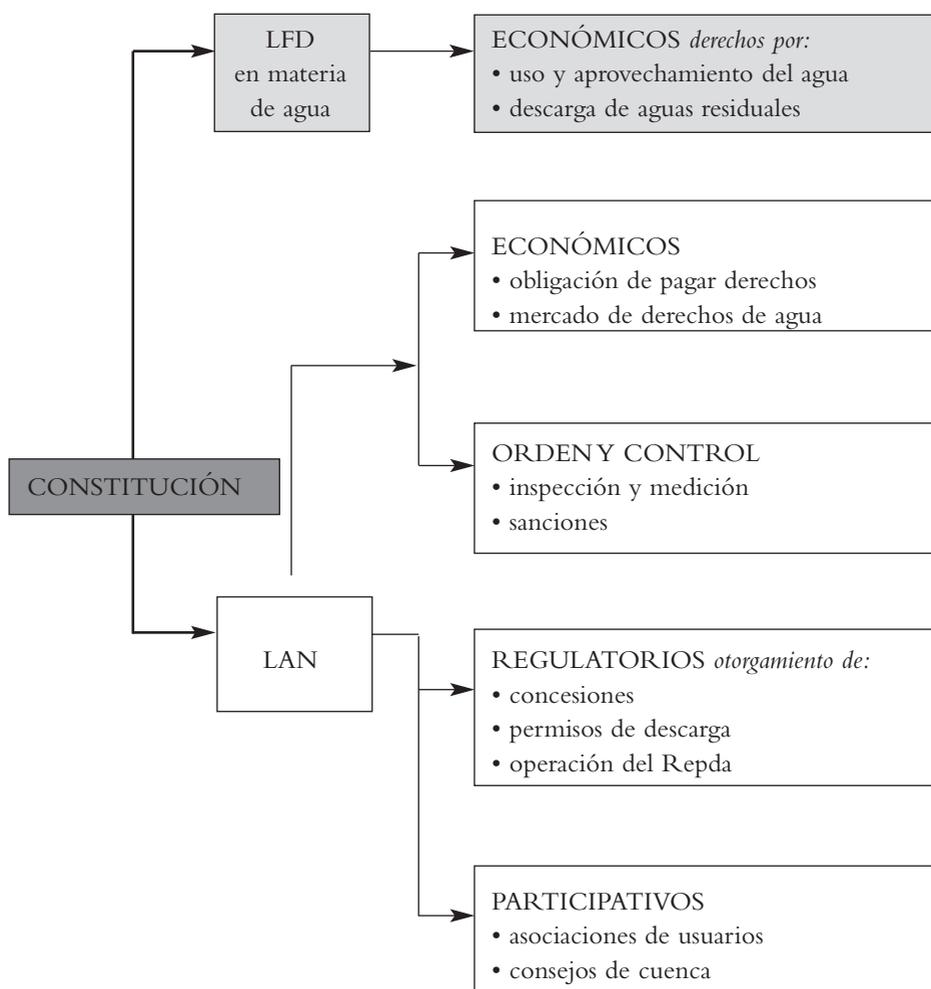


FIGURA 1. Instrumentos para la administración del agua.

La LFD clasifica en nueve zonas de disponibilidad a cada uno de los municipios del país en función de la escasez o abundancia del recurso hídrico y establece tarifas diferentes para el derecho por uso de aguas nacionales con valores mayores para las zonas de mayor escasez. A los organismos operadores de agua potable, alcantarillado y saneamiento (OOAPAS) se les otorga una tarifa menor y a los usuarios de riego se les exenta del pago de cargos, hasta por el volumen de agua concesionado.

El cobro por descarga de aguas residuales se hace por tipo de contaminante y en función de qué tanto se rebasan los límites máximos permisibles estableci-

dos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Conforme a esta norma, los usuarios sólo tienen que cumplir con los valores límite establecidos para los contaminantes que producen. La norma tiene en cuenta tanto el uso del cuerpo receptor como su vulnerabilidad. Incorpora una política de proceder gradualmente, afirmando que los contaminadores principales debían cumplir en el año 2000, los intermedios en el 2005 y los menores en el 2010. Sin embargo, las plantas de tratamiento que existían cuando se publicó la norma debían seguir operando de acuerdo con sus permisos originales de descarga o con las normas nuevas, dependiendo de la voluntad del usuario. En caso de que la calidad de la descarga superara la nueva norma, el usuario podía solicitar que se aplicara un descuento a los cargos por extracción de aguas nacionales. Los usuarios cuyos contaminantes excedieran los valores límite marcados para cualquiera de los parámetros de la nueva norma tenían que presentar, un año después de que se adoptó la norma, un programa de diseño y construcción para mejorar la calidad de sus aguas residuales. El resto de los usuarios debía presentar un programa similar varios años antes de su fecha de cumplimiento (por ejemplo, según el esquema anterior, una ciudad o una industria mediana tenía que presentar su programa para diciembre del 2000 y comenzar a cumplir la norma para enero del 2005). Aquellos usuarios que presentaran sus programas a tiempo quedarían exentos de pagar cargos por descarga durante el periodo de construcción si avanzaran de acuerdo con sus programas.

Los *instrumentos económicos* se refieren a la obligación del pago de los cargos previstos en la LFD, independientemente de que el usuario cuente o no con su respectiva concesión, y la posibilidad de transferir derechos de agua bajo las siguientes reglas:

- los usuarios son libres de transferir sus derechos dentro de los distritos de riego, sin intervención alguna de la Comisión;
- cuando sólo cambia el usuario y no se modifican las características del título de concesión, los usuarios también están en libertad de transferir sus derechos, aunque todas las transacciones deben registrarse;
- en las áreas designadas por la Comisión, registrando las transacciones correspondientes;
- todas las demás transacciones están sujetas a aprobación con el fin de proteger al ambiente y a terceros.

Los *instrumentos de orden y control* de la LAN incluyen la inspección y medición para verificar que los usuarios cumplan con los términos y condiciones de sus concesiones y permisos de descarga, así como las sanciones en caso de incumplimiento. Los *instrumentos regulatorios* se refieren principalmente al otorgamiento de concesiones y permisos de descarga, por plazos que pueden ir de 5 a 50 años. Adicionalmente, se cuenta con el Registro Público de Derechos de Agua

(Repda), el cual tiene como objetivo “Proporcionar seguridad jurídica³ a los usuarios de aguas nacionales y bienes inherentes, a través del registro oportuno y confiable de los títulos de concesión, asignación y permisos así como las modificaciones que se efectúen en las características de los mismos”. Finalmente los *instrumentos participativos* prevén la organización de los usuarios —por ejemplo para distribuir el agua en un módulo de riego y operar y mantener la infraestructura— y el establecimiento de Consejos de Cuenca para conciliar los intereses de los gobiernos federal, estatales y municipales con los de los usuarios y otros grupos interesados.

ii. Procedimiento para la Administración de Derechos de Agua

En el procedimiento general intervienen varios actores: el solicitante, el usuario, diversos grupos interesados, la autoridad del agua y el Poder Judicial. La figura 2 muestra las interrelaciones entre ellos.

- El proceso inicia cuando una persona solicita una concesión o un permiso de descarga de aguas residuales.⁴ Por lo general, se presenta la solicitud con la información y los documentos requeridos en una de las gerencias estatales de la CNA. Dependiendo del volumen de extracción requerido y de la relativa escasez de agua, el gerente estatal decide o prepara una opinión y la transmite, ya sea al gerente regional correspondiente o a las oficinas centrales. Si no hay suficiente agua, la solicitud es denegada. Si es aprobada, se emite el título correspondiente, se registra en el Repda y se entrega al solicitante.
- Todos los documentos relevantes, sin importar si la decisión resultó favorable o no, deben integrarse apropiadamente en el expediente y salvaguardarse para su consulta futura. El proceso implica varias etapas y la participación de diferentes oficinas, y es necesario llevar la cuenta del tiempo porque la Comisión tiene que responder en un plazo máximo de 90 días laborales después de la fecha en la que el solicitante haya entregado todos los documentos requeridos. Un título es la prueba legal de los derechos de agua de un usuario, por lo que se debe mantener su registro en el Repda, así como cualquier cambio de la situación, como la fecha de caducidad u otros cambios debidos a la transferencia de derechos.

³ La seguridad jurídica mencionada se refiere, entre otras cosas, a la certeza que otorga un título de concesión al usuario de que —dentro de los límites impuestos por la variabilidad natural del ciclo hidrológico— podrá utilizar el volumen anual de agua concesionado durante el término que dure su concesión, tendrá derecho a renovarla por un lapso igual y tendrá medios legales para oponerse a actos de terceras personas cuyas acciones pongan en peligro dicha certeza.

⁴ Para efectos ilustrativos sólo se describe el procedimiento relacionado con la concesión para usar agua.

- Los usuarios deben acatar los términos y condiciones de sus títulos de concesión y de los permisos de descarga de aguas residuales, así como hacer declaraciones trimestrales del volumen extraído y la carga contaminante de la descarga de aguas residuales, y efectuar los pagos correspondientes. El monitoreo se lleva a cabo en forma de muestreo, para verificar si los usuarios están cumpliendo con los términos y condiciones de sus títulos y permisos y si han pagado la cantidad correcta. Se llevan registros con propósitos estadísticos y legales. La autoridad del agua tiene la facultad de sancionar a los usuarios que no cumplan y a los usuarios ilegales que detecte.

Si el usuario está en desacuerdo, ya sea con la decisión sobre su solicitud o con las sanciones impuestas, puede interponer un recurso de revisión ante la CNA misma o los tribunales. La ley exige un seguimiento cercano de cada recurso.

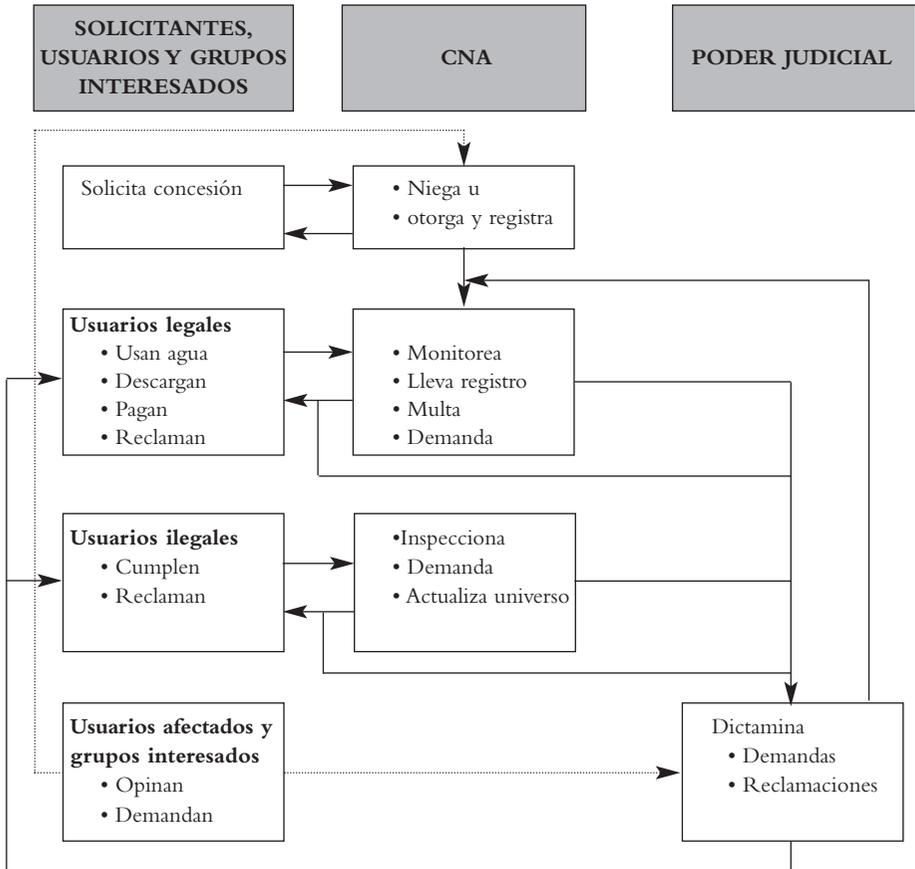


FIGURA 2. Diagrama del procedimiento de administración de derechos de agua.

REGULARIZACIÓN Y COBRO

i. Regularización de los usos de agua existentes

Como se mencionó anteriormente, se estimaba que para 1992 había unos 300 000 usuarios de agua pero sólo se habían emitido 2 000 concesiones entre 1917 y 1992, principalmente porque durante décadas la facultad de otorgar derechos de agua era exclusiva del Presidente de la República. La LAN de 1992 contemplaba que durante 1994 deberían inscribirse en el Repda los permisos precarios, y los permisos o autorizaciones provisionales expedidos por la autoridad competente, los cuales darían derechos a sus titulares para explotar o usar aguas nacionales por un periodo que no podría exceder a 10 años. Además, solamente otorgaba un año para que todos los usuarios de agua existentes obtuvieran una concesión y se registraran —concretamente, para diciembre de 1993. El Reglamento establecía que para ciertos usuarios dicho periodo podía extenderse por dos años más— concretamente, para diciembre de 1995. Esto significa que las restricciones temporales eran muy estrictas, pero la LAN investía al Director General de la CNA con la autoridad para otorgar concesiones y contemplaba la delegación de ciertas funciones. Desde 1993, incluso antes de que se emitiera el Reglamento, se había delegado la autoridad para otorgar concesiones y permisos de descarga de aguas residuales al Subdirector General de Administración del Agua, así como a los gerentes regionales y estatales. También, con el fin de aumentar la apropiación del nuevo enfoque y apresurar el proceso de registro, se entrenó personal inmediatamente después de que la ley fue adoptada.

De 1993 a mediados de 1995, el avance en la regularización fue lento, porque los requisitos legales y reglamentarios eran difíciles de acatar, ya que el gobierno no tenía suficiente capacidad para atender la regularización dentro del periodo de transición que contemplaban la ley y su reglamento. Por ello, se consideró necesario simplificar los requisitos para obtener y registrar los títulos de concesión y los permisos de descarga de aguas residuales. Adicionalmente, fue necesario emitir varios decretos presidenciales sucesivamente de 1995 hasta 2002, otorgando facilidades administrativas y fiscales (exención de cargos no pagados) para que los usuarios que estuviesen usando aguas nacionales antes de la fecha de emisión de los primeros decretos, obtuviesen su concesión de uso y permiso de descarga y los registraran en el Repda.

La Ley de Aguas Nacionales contempla que las concesiones tengan una duración de 5 a 50 años. Sin embargo, los decretos presidenciales establecieron que todos los usuarios que ingresaron su solicitud obtendrían una concesión de diez años. El razonamiento fue que en un periodo de diez años mejorarían los conocimientos sobre la disponibilidad del agua y su uso y de esa manera, cuando los usuarios solicitaran la renovación de sus concesiones, se podrían tomar decisiones más informadas. También se supuso que en ese lapso se consolidarían los

Consejos de Cuenca, lo cual haría factible que, mediante procesos participativos, los usuarios accedieran a que sus títulos de concesión se renovaran por volúmenes inferiores para lograr el equilibrio hidrológico en cuencas y acuíferos. En 1993 se lanzó una vigorosa campaña de información. Más adelante, la campaña se intensificó y también se llevaron a cabo cientos de reuniones en todo el país con el fin de inducir a los usuarios de agua a regularizar su situación administrativa y fiscal ingresando su solicitud para obtener los beneficios de los decretos.

Como resultado de la simplificación de procedimientos, de los decretos presidenciales y de la campaña de comunicación, para diciembre de 1997 cerca de 200 000 usuarios habían presentado su solicitud y hacia diciembre de 2000 se habían otorgado y registrado unos 320 000 títulos de concesión de aguas nacionales. La última cifra de títulos registrados es de cerca de 330 000 títulos de concesión. En la figura 3 se presenta la evolución del número de títulos de concesión de aguas nacionales en el periodo 1992-2003 en relación con las medidas clave legislativas y de administración del agua que se fueron tomando.

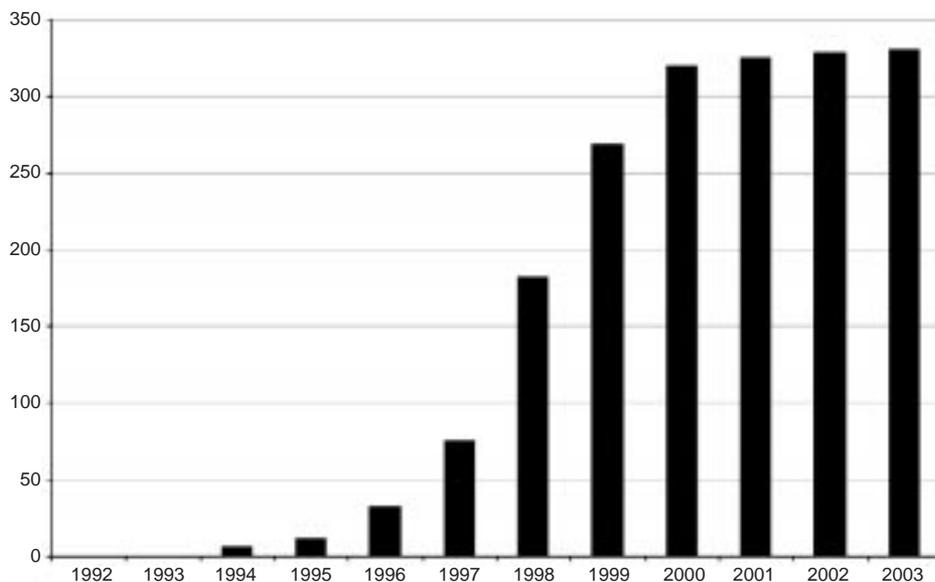


FIGURA 3. Miles de títulos de concesión acumulados para el uso de aguas nacionales registrados en el Repda de 1992 a 2003.

<i>Año</i>	<i>Medidas clave legislativas y administrativas</i>
1992	Diciembre: promulgación de la LAN
1993	Octubre: el director general de la CNA delega el otorgamiento de títulos y se inicia una vigorosa campaña de comunicación
1994	Enero: el presidente de la República emite el Reglamento de la LAN
	Agosto: el director general de la CNA simplifica los procedimientos
1995	Octubre: el presidente de la República emite el primer juego de decretos de regularización
1996	Octubre: el presidente de la República emite el segundo juego de decretos de regularización
2001	Diciembre: el presidente de la República emite decretos específicos para organismos operadores de Agua potable y Saneamiento
2002	Diciembre: el presidente de la República emite un decreto específico para usuarios agrícolas

Se logró la meta de regularizar prácticamente a la totalidad de usuarios de aguas nacionales, pero el proceso demoró 10 años en lugar del año previsto por la LAN y los dos años adicionales establecidos en su reglamento. Además, dado que en los decretos se estableció que los volúmenes a concesionar fueran los que los usuarios declarasen a la autoridad bajo protesta de decir verdad, ocurrieron los siguientes tropiezos:

- *En numerosos acuíferos y cuencas los volúmenes concesionados exceden a la disponibilidad de agua.* En su momento se razonó que, dado que era imposible inspeccionar todo el territorio nacional para detectar usuarios ilegales, era preferible invitarlos a regularizarse y tener una información muy valiosa para la gestión de los recursos hídricos y que si no se hubiera hecho de esa manera, de cualquier forma en los acuíferos y las cuencas se estaría usando más agua de lo prudente.
- *Numerosos usuarios declararon volúmenes mayores a los efectivamente usados.* Algunos de estos usuarios, posteriormente han transmitido en forma parcial los excedentes de agua no utilizados, propiciando una presión sobre la demanda y provocando una mayor explotación del recurso, lo cual ocasiona daños a los demás usuarios y al ambiente —especialmente en acuíferos sobrexplotados.
- *Parte de la información en el Repda es de dudosa confiabilidad.* A causa de la gran velocidad que se imprimió al proceso de regularización, existe un número importante de títulos con diversos tipos de errores u omisiones.

Adicionalmente, existen usuarios con título de concesión para uso agrícola que emplean el recurso para fines distintos, incurriendo en delitos fiscales y en desviaciones del subsidio, ya que no solamente gozan indebidamente de la exención

del pago del derecho, sino del subsidio que se otorga a los usuarios agrícolas en la tarifa eléctrica. Consecuentemente, deterioran la recaudación y por ende el financiamiento de los programas institucionales.

Con objeto de solventar las fallas en que se incurrió en el proceso de regularización y asegurar que los usuarios utilizan el agua conforme a sus títulos de concesión, se realizan visitas de inspección, que son la principal herramienta con la que cuenta la administración del agua, para conformar un padrón confiable de usuarios. Estas visitas tienen por objeto validar en campo la información contenida en los títulos de concesión así como verificar el cumplimiento de las obligaciones establecidas en la Ley de Aguas Nacionales y demás disposiciones reglamentarias aplicables. El programa de visitas de inspección ha dado prioridad a verificar a los usuarios que aprovechan agua de acuíferos sobreexplotados y cuencas sobre-concesionadas. Sería deseable llevar un seguimiento cercano al proceso de depuración con objeto de conocer cómo va incrementándose la proporción de títulos confiables y en su caso establecer metas para lograr ciertos niveles deseables.

ii. Regularización de las descargas de aguas residuales existentes

Con el objeto de corroborar que los usuarios de descargas de aguas residuales en cuerpos receptores de propiedad de la nación, cumplieran con la normatividad en las fechas estipuladas (tabla 1), se estableció el programa para el cumplimiento de la norma oficial mexicana NOM-001-Semarnat-1996. La estrategia del programa ha sido realizar visitas de verificación a los usuarios que estaban obligados a cumplir con la NOM a partir del 1 de enero de 2000, en donde se toman muestras de las descargas y se analizan en laboratorios acreditados por EMA (Entidad Mexicana de Acreditamiento). Durante el periodo 2000-2001 se visitaron a 226 usuarios industriales, comerciales y de servicios de los que debían cumplir la NOM-001-Semarnat-1996 a partir del 1 de enero de 2000. Se detectó que 168 usuarios no cumplían la NOM, por lo que se estableció un programa de seguimiento tomando en cuenta las condiciones específicas de cada industria.

TABLA 1
FECHAS DE CUMPLIMIENTO
DE LA NOM-001-SEMARNAT-1996

<i>A partir de</i>	<i>Carga Contaminante (toneladas/día)</i>	
	<i>DBO₅</i>	<i>Sólidos suspendidos totales</i>
1 enero 2000	mayor de 3.0	mayor de 3.0
1 enero 2005	de 1.2 a 3.0	de 1.2 a 3.0
1 enero 2010	menor de 1.2	menor de 1.2

iii. Cobro de derechos por uso y descarga

Uno de los instrumentos económicos más importantes para la administración del agua es el cobro de cargos por concepto de uso de agua. En 1989, cuando la CNA fue establecida, tal cobro se introdujo por primera vez en México, con un doble propósito: *a)* mejorar la eficiencia en el uso del agua, promover un cambio gradual hacia usos más rentables económicamente y disuadir la contaminación, y *b)* obtener fondos para la gestión y el desarrollo de los recursos hídricos. La figura 4 muestra los ingresos por el cobro de cargos por concepto de uso de agua de 1989 a 2002. Obsérvese el incremento anual consistente (inclusive en términos reales) hasta 1993, y cómo empezó a descender en 1994 a causa de una crisis económica nacional y no ha podido recuperar el nivel récord de 1993.

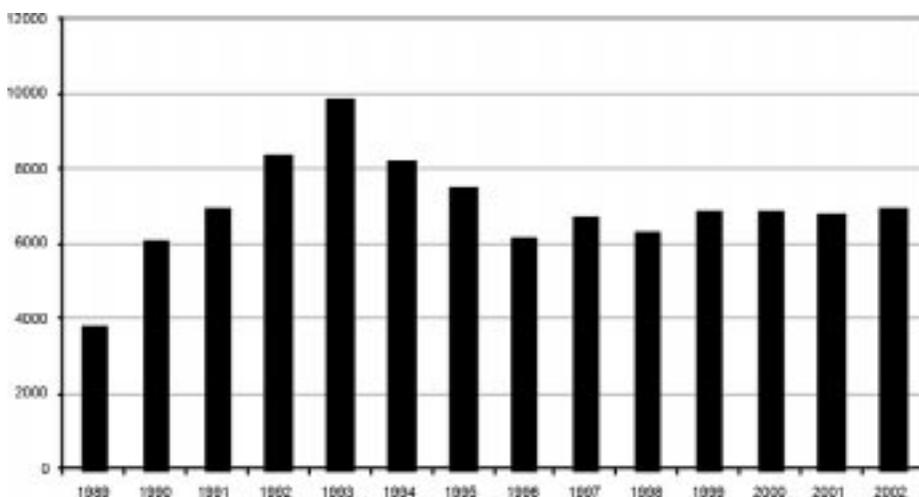


FIGURA 4. Cobro de derechos por concepto de uso de agua de 1989 (en millones de pesos constantes a 2002).

Los ingresos por concepto de aprovechamiento de las aguas nacionales provienen principalmente de los pagos que efectúan la industria y la generación de energía eléctrica; la recaudación a los organismos operadores de agua potable, alcantarillado y saneamiento (OOAPAS) es muy inferior y el riego estaba completamente exento de este impuesto hasta antes de las modificaciones recientes a la LFD que se describen más adelante. Tradicionalmente, los subsidios de agua en México han sido usados para lograr objetivos sociopolíticos específicos de seguridad alimentaria, agua potable, y aumento de los ingresos y mejoramiento de la salud de las poblaciones rurales de bajos recursos. Aunque esto en sí es loable, la eficiencia total del uso de agua en el país como un todo necesita racionalizar-

se, particularmente en lo que respecta al uso agrícola. El ideal económico sería eliminar los subsidios cruzados; sin embargo, en los países en donde los usuarios deben pagar por uso del agua como recurso natural, es usual que la industria aporte la mayor proporción del dinero para sufragar los costos de la gestión y el desarrollo de los recursos hídricos. Además, la mayoría de los servicios de agua potable municipales tienen problemas financieros y los agricultores tienen un estatus social y político alto. Aun así, los subsidios cruzados se están eliminando, aunque muy lentamente.

Uno de los beneficios asociados con la aplicación del cobro del agua es que ha fomentado el ahorro de agua en la industria y una distribución geográfica más racional de las actividades que requieren de agua. También la amenaza de multar a los contaminadores que no cumplan con las normas de descarga de aguas residuales ha motivado la construcción de numerosas plantas de tratamiento. Además hay un incentivo adicional en la construcción de plantas de tratamiento, y es que las industrias y los municipios que lo hacen quedan exentos de pagar los cargos de descarga de aguas residuales durante el periodo de construcción.

iv. Sistema de Información

Se ha desarrollado una metodología para estructurar y vincular las diversas bases de datos que apoyan las labores de administración del agua y con apoyo en empresas especializadas se llevan a cabo mejoras continuas. Uno de los beneficios de estas acciones es la obtención de un solo Padrón de Usuarios integrado, a efecto de dar cumplimiento a lo establecido en la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, con el propósito de mejorar y dar mayor transparencia al registro y control de la recaudación a través del Sistema Red Agua y el Repda. La comparación de ambas bases de datos permite identificar a los usuarios que presentan irregularidades en el cumplimiento de sus obligaciones fiscales. Por ejemplo, en el año 2002 se detectaron a 8 696 usuarios omisos con un adeudo estimado de 416 millones de pesos, de los cuales, a través de gestiones no fiscales, se han regularizado 3 268; recuperando un monto de 127 millones de pesos.

FORTALECIMIENTO DEL SISTEMA DE ADMINISTRACIÓN DE DERECHOS DE AGUA

Hacer valer la ley, mediante la vigilancia del cumplimiento de los términos y condiciones de los títulos de concesión y permisos de descarga es seguramente la tarea más difícil, pero más importante de la administración de derechos de agua. Por ello, una vez que la mayor parte de los usuarios habían sido regularizados, se reforzaron los mensajes a la sociedad de que la autoridad del agua en efecto está ejerciendo el poder que le otorga la Constitución y la legislación de

aguas. Las medidas descritas a continuación han sido tomadas a partir de 2001 y seguramente contribuirán a incrementar la credibilidad de dicha autoridad.

i. Refuerzo de la aplicación de la ley

Se inició un gran esfuerzo para aplicar estrictamente la Ley de Aguas Nacionales, en particular, para *ejecutar sanciones diferentes a las económicas*, las cuales pueden ir desde la suspensión temporal del proceso generador de la descargas de agua residual y la suspensión del derecho a usar aguas nacionales, hasta la clausura definitiva de los aprovechamientos o descargas, lo cual contribuye a abatir la impunidad de los infractores de la LAN. La tabla 2 contrasta las cifras de actos de autoridad durante el periodo de regularización de usuarios y los años posteriores. Además, hacia mediados de 2003, estaban en curso 145 procedimientos administrativos que pueden traducirse en sanciones diferentes a las económicas.

TABLA 2
ACTOS DE AUTORIDAD EN EL PERIODO 1995-2002

	1995-2000	2001	2002
Clausura de aprovechamientos irregulares	3	7	7
Suspensión de procesos generadores de descargas residuales	n.d	0	2
Denuncias penales*	n.d	0	58

n.d. No disponibles

* Independientemente del número de clausuras y suspensiones

Se implantaron *acciones para abatir la discrecionalidad* en los procesos de otorgamiento de concesiones y permisos, encaminadas a establecer claramente la normatividad de los trámites necesarios para obtener títulos de concesión y difundirla entre los usuarios y servidores públicos. Se elaboraron los manuales de procedimientos de los principales trámites inscritos en el Registro Federal de Trámites y Servicios, entre los que destacan los de transmisión de derechos, prórrogas y caducidades de concesiones y permisos de descarga de aguas residuales; así como la difusión de esta normatividad a los usuarios a través de carteles, folletos e Internet y por medio de la comunicación directa con grupos de usuarios como son los comités técnicos de aguas subterráneas (Cotas) y los Consejos de Cuenca. Adicionalmente, se trabajó para dar transparencia a los procedimientos para verificar la información contenida en los títulos de concesión y permisos de descarga de aguas residuales otorgados a usuarios de aguas nacionales. De esta manera, se actualizó la guía para la realización de las visitas de inspección y se estableció la obligación de dar a conocer al usuario los derechos y obligaciones que tiene ante una visita de inspección.

Lucha contra la corrupción. Como muchos otros países, la administración de derechos de agua en México no escapa a eventos de cohecho y corrupción. Entre las medidas que se están tomando para enfrentar este problema se encuentran:

- Vigilancia más estrecha del trabajo del personal, para detectar comportamientos no éticos y aplicar sanciones severas.
- Preparación y difusión al personal y los usuarios de manuales de procedimientos para transferencia de derechos, caducidad y renovación de concesiones, entre otros.
- Mejoramiento de las actividades de monitoreo y comunicación con los usuarios para que estén conscientes de sus derechos y obligaciones.
- Respuesta en tiempo y forma a las quejas de usuarios y otros grupos interesados.

ii. Mayor Control de los Usuarios Industriales, Comerciales y Servicios

Tomando en cuenta que este sector es el que más contribuye a la recaudación de cargos en materia de agua, se desarrolló un programa para la *detección de usuarios morosos o evasores* que consta, entre otros aspectos, de la identificación de usuarios omisos, morosos o para los que existe presunción de comportamientos evasores, así como un programa para la promoción del cumplimiento voluntario, mediante el seguimiento a los pagos de grupos seleccionados. De esta manera la aplicación de la normatividad permite fortalecer la presencia fiscal de la autoridad del agua entre los distintos usuarios. Por otra parte, se ha intensificado su *programa de visitas de inspección*. En efecto, en 2002 se efectuaron 4545, cifra 159% mayor a las efectuadas en el 2001 y 289% superior al promedio anual durante el periodo 1995-2000.

También se han intensificado las medidas de *prevención y control de contaminación del agua*. De los 226 usuarios verificados durante el periodo 2000-2002, se encontró que 74% no cumplió con la norma. En el país los aportes de carga contaminante, medida en materia orgánica, están concentrados en un número limitado de actividades, entre las que destacan la industria azucarera, la fabricación de alcohol y bebidas alcohólicas, la industria del papel y celulosa, la industria química y la industria petrolera. En consecuencia, se ha dado prioridad al control de estos giros. Por ejemplo, de conformidad con los tiempos establecidos por la NOM-001-Semarnat-1996, los *ingenios azucareros* debieron haber cumplido con los límites máximos permisibles de concentración de contaminantes a partir del 1 de enero del 2000. Sin embargo, más de 75% de los ingenios a los que se les efectuó visitas de inspección no cumplieron. El adeudo generado por estos conceptos asciende a casi 26 mil millones de pesos. Derivado de lo anterior, se estableció un programa específico con los ingenios azucareros; hacia mediados de 2003 12 ingenios ya cumplían con la NOM. Asimismo, se están llevando a cabo

reuniones con los otros ingenios en donde asumen el compromiso de que se llevarán a cabo las acciones necesarias para cumplir la NOM.

Otro ejemplo es la *industria alimenticia*, cuyas descargas de aguas residuales requieren en muchos casos de tratamientos costosos; en este caso, sólo 17% de las empresas verificadas cumplió. En un tercer ejemplo, la *industria química*, en la que a causa de la heterogeneidad de sus descargas, los sistemas de depuración deben diseñarse para cada caso en particular; sólo 30% de las empresas cumplió con la norma.

iii. Depuración del Padrón de Usuarios Agrícolas e Incentivos para Aumentar la Eficiencia en el Uso Agrícola

Detección de usuarios no agrícolas que se ostentan como tales. Los usuarios agrícolas, además de ser los principales consumidores del agua y estar exentos del pago de cargos, están sujetos a las tarifas eléctricas preferenciales 9 y 9M, que abaratan la extracción del agua subterránea. Para verificar que los usuarios que disfrutaban del subsidio de las tarifas eléctricas son efectivamente usuarios agrícolas, la CNA y la Comisión Federal (CFE) celebraron un convenio de colaboración para cruzar las bases de datos y detectar a los posibles usuarios que desvían el uso autorizado y disfrutaban de la exención del pago de cargos así como de las tarifas eléctricas subsidiadas. A mediados de 2003 se habían identificado 425 usuarios que en sus títulos de concesión tienen autorizados un uso diferente al agrícola, por lo que se llevarán a cabo los procedimientos correspondientes para sancionarlos.

Decreto adicional para regularizar usuarios. Por otra parte, cifras preliminares a enero de 2002 indican la existencia de un número importante de usuarios con actividad agrícola que no se habían adherido a los decretos de facilidades administrativas de 1995 y 1996, y que no habían regularizado su situación después de esta fecha⁵. Con el fin de que estos usuarios pudiesen acreditarse como concesionarios de aguas nacionales de uso agrícola y beneficiarse de las tarifas subsidiadas de energía eléctrica, se publicó nuevamente un decreto de facilidades administrativas el 4 de febrero de 2002. Este decreto estableció que sólo se podrían regularizar a los usuarios que demostraran que habían estado utilizando el recurso desde antes del 12 de octubre de 1995, requisito que evitaba la regularización de pozos clandestinos posteriores a esa fecha; asimismo establecía que las concesiones se otorgarían por un volumen anual en función de una lámina de riego de 60 centímetros, con objeto de reducir el desperdicio del recurso.

⁵ Al 31 de diciembre de 2001 se tenía conocimiento de aproximadamente 5000 usuarios agrícolas que no se habían adherido a los decretos.

Modificación a la LFD. Con la finalidad de transmitir a los usuarios agrícolas el costo de oportunidad del recurso y corregir las externalidades provocadas por el desperdicio y la contaminación del mismo se modificó la LFD. Tratándose de agua destinada a usos agropecuarios —quienes estaban exentos del derecho por la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales por el total del consumo—, se estableció el pago de \$0.10 por cada metro cúbico que exceda el volumen concesionado.⁶ La reforma establece que podrán utilizar métodos indirectos para determinar el consumo de agua del sector agrícola. Para tal efecto, se han establecido convenios con la CFE para que proporcione a la CNA un estimado de los consumos de los usuarios agrícolas que gozan de tarifas eléctricas preferenciales.

En forma complementaria, en enero de 2003, se publicó en el Diario Oficial de la Federación el *Acuerdo Tarifario que establece la tarifa eléctrica preferencial 9-CU para usuarios agrícolas*, que es todavía menor a las tarifas eléctricas ya subsidiadas. Los usuarios agrícolas podrán acceder a esta nueva tarifa hasta un determinado monto de kilowatts-hora suficiente para bombear el volumen de agua concesionado, de tal manera que los usuarios agrícolas que excedan el monto determinado de kilowatts-hora deberán de pagar la tarifa 9 y 9M por los kilowatts-hora adicionales. La autoridad del agua tendrá acceso a esta información, que podrá ser utilizada para determinar indirectamente el volumen de agua que los usuarios agrícolas consuman en exceso. Esto ayudará a cumplir la modificación a la LFD en el sentido de que los usuarios agrícolas deben pagar \$0.10 por cada metro cúbico que exceda lo concesionado.

iv. Medidas de apoyo y control para los organismos operadores de agua potable, alcantarillado y saneamiento

Los OOAPAS son organismos descentralizados encargados de ejercer las funciones y servicios de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de las aguas residuales de los municipios conforme el Artículo 115 de la Constitución. Como se mencionó antes, estos organismos disfrutaban de una tarifa preferencial en la LFD lo cual les da un amplio margen de ganancias cuando abastecen del recurso a las industrias cobrándoles tarifas muy superiores a lo que ellos pagan por la materia prima.

Apoyos. Hasta el año 2001, los organismos operadores presentaban importantes adeudos por concepto de uso de aguas nacionales y descarga de aguas residuales, respectivamente. La mayoría de los organismos no habían llevado a cabo un

⁶ Esta reforma entrará en vigor a partir del 1° de octubre de 2003, en términos del artículo primero transitorio del decreto de reformas; artículos 223, Apartado C y 224, fracción IV de la LFD.

programa para el tratamiento de sus aguas residuales ante la falta de recursos financieros, a pesar de que la descarga de aguas residuales en los cuerpos receptores, sin el debido tratamiento, pone en riesgo la salud pública y el equilibrio ecológico. Consecuentemente, el 21 de diciembre de 2001 se publicaron los decretos por los que se condonan a organismos operadores las contribuciones y accesorios en materia de descargas de aguas residuales en cuerpos receptores, así como por el derecho del uso de aguas nacionales. El 23 de diciembre de 2002 se publicaron nuevos decretos con el propósito de que los prestadores de estos servicios tuvieran mayores facilidades para adherirse a ellos, tales como la ampliación del plazo de la solicitud de adhesión, así como ofrecerles alternativas para cumplir con las garantías que los municipios deben otorgar a la Secretaría de Hacienda y Crédito Público para acceder a sus beneficios. Adicionalmente, se modificó la LFD para que los ingresos que se obtengan de los prestadores de servicios se destinen a la realización de acciones de mejoramiento de eficiencia y de infraestructura de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, contenidas en los programas que al efecto establezca la CNA para lo cual los municipios deberán destinar una cantidad igual que la de los derechos devueltos. La recaudación de los cargos por pago de agua potable, correspondientes al año 2002 ascendió a poco más de 1 250 millones de pesos; de esta manera, se han destinado más de 2 500 millones de pesos a la realización de obras y acciones de mejoramiento en beneficio de los OOAPAS. Hacia mediados de 2003, 1007 municipios, aproximadamente la tercera parte del total del país, habían cumplido con la LFD.

Controles. Dentro de las reformas a la Ley Federal de Derechos para el ejercicio fiscal 2003 se estableció, en el caso de aguas provenientes de fuentes superficiales o extraídas del subsuelo destinadas a uso de agua potable, el pago de una tarifa cuando el consumo de agua en el periodo sea inferior o igual a un volumen equivalente a los 300 litros por habitante por día, y de otra tarifa mayor cuando el consumo sea superior a los volúmenes antes señalados.⁷ Esta modificación tiene por objeto transmitir a los organismos operadores el costo de oportunidad del recurso y evitar que abastezcan al sector industrial, comercial y de servicios, a tarifas inferiores a las de la LFD que deben pagar este sector cuando se auto abastece. De esta manera, también se evita que los OOAPAS utilicen el agua para fines distintos a los señalados en sus títulos de concesión. En forma complementaria, se formalizó el programa de visitas integrales para verificar los aprovechamientos de agua de los 125 organismos operadores correspondientes a localidades con una población mayor a 50 000 habitantes.

⁷ Artículo 223, Apartado B, fracción I.

PERSPECTIVAS

Con la promulgación de la Ley de Aguas Nacionales en 1992 inició una etapa nueva en la gestión de los recursos hídricos en México, que transforma a la Comisión Nacional del Agua de un organismo constructor y operador de grandes obras hidráulicas, en una institución cuya principal responsabilidad es la de administrar el recurso. Un componente fundamental en este proceso es la administración de derechos de agua y al respecto en los últimos diez años se han ido sentando bases sólidas, principalmente con:

- Un Repda que incluye a la casi totalidad de usuarios de aguas nacionales, imperfecto, pero cuyas fallas se están corrigiendo.
- Apoyos y controles específicos para cada grupo de usuarios (agrícolas, municipales e industriales) con objeto de que por una parte tengan la capacidad de cumplir con la ley y por otra sean sancionados cuando no lo hagan.

El reto para los próximos años es el de consolidar el sistema de administración de los derechos de agua, para compatibilizar el crecimiento económico y demográfico con la disponibilidad de agua, en el marco de un desarrollo sustentable. Para ello es indispensable insertar plenamente la administración de derechos de agua en la gestión de los recursos hídricos. Hace falta que dentro de las diversas actividades genéricas de la planeación y gestión de los recursos hídricos se le dé la relevancia que deben tener los derechos de agua. Por ejemplo, los balances deben estar basados en los valores de uso y descarga de agua registrados en el Repda, y las decisiones de inversión en infraestructura hidráulica de riego y agua potable deben estar precedidas por un análisis serio de disponibilidad de agua y el otorgamiento correspondiente de títulos de concesión, para evitar que las decisiones de inversión apresuradas presionen para otorgar títulos de concesión en donde no hay agua.

REFERENCIAS

- Cantú M. y Garduño, H., 2003, "Anexo 2. México", en Garduño, H. (ed.), *Administración de Derecho de Agua: experiencias, asuntos referentes y lineamientos*, FAO, 2003, Estudios Legislativos 81, ISBN 92-5-305033-0, Roma.
- CNA, 2001, *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*.
- CNA, 2001, *Compendio Básico del Agua en México 2002*, tercera edición, diciembre.
- CNA, 2003, *Estadísticas del Agua en México*, primera edición, marzo.
- Garduño, H. (ed.), 2001, *Water Rights Administration: experience, issues and guidelines*, FAO Legislative Study, 70, ISBN 92-5-104548-8, Rome.

LA PARTICIPACIÓN PRIVADA EN LOS SERVICIOS DE AGUA Y SANEAMIENTO EN MÉXICO

Rubén Barocio R. y Jorge C. Saavedra S.

RESUMEN

Este documento trata, en forma muy breve, de la situación de los servicios de agua y saneamiento en México, de las formas en que la iniciativa privada puede participar en el mejoramiento de esos servicios, de los riesgos que esa participación puede conllevar, de las condiciones necesarias para que esta participación privada sea exitosa y de las experiencias concretas que en ese campo se han dado en nuestro país. Se presentan algunas conclusiones preliminares derivadas de esa experiencia.

No está de más mencionar que el documento trata de reflejar situaciones de orden práctico, sin presentar posturas de carácter ideológico, lo cual puede ser una tentación en temas como el que aquí se trata. Se ha evitado también elaborar comparaciones sobre la gestión pública y privada, con base en la teoría económica.

El documento consta de nueve partes, en la primera se hace un apretado resumen de las tendencias que en el ámbito global se han dado en las dos últimas décadas hacia la participación privada en los sistemas de agua y saneamiento, actividades que, en la mayor parte de los países fueron llevadas a cabo, por lo menos durante la primera parte del siglo XX, casi exclusivamente por organizaciones del sector público. A continuación se comentan las dos diferentes modalidades de participación privada que se han venido utilizando: la “privatización”, entendida como la transferencia total a empresas privadas de la responsabilidad por la prestación de los servicios, incluyendo la propiedad de la infraestructura necesaria así como el mantenimiento y expansión de la misma y la obtención y el manejo de los recursos financieros necesarios. Y, la segunda, la que comúnmente se ha denominado “participación privada” que, según su modalidad, la responsabilidad del sector privado varía, desde contratos parciales en apoyo a los organismos operadores del sector público, hasta la concesión total de los servicios; en éstas mo-

dalidades la infraestructura continúa siendo propiedad del sector público, con excepciones temporales en alguna de esas modalidades.

En la tercera parte del documento se presenta alguna información sobre el subsector de agua y saneamiento en nuestro país. Se concluye que si bien se han logrado avances importantes, sobre todo cuando se considera el crecimiento poblacional de las últimas décadas, se tienen rezagos que es necesario abatir para lograr niveles de bienestar aceptables en la totalidad de la población, rezagos que tienen diversas causas, entre ellas la carencia de suficientes recursos financieros, técnicos y administrativos. Y, desde luego, es necesario atender las demandas de una población que todavía crece a tasas relativamente elevadas.

El siguiente punto que nos ocupa se trata de las posibles contribuciones que las empresas privadas pueden aportar en el logro de las metas nacionales. También analizamos, los riesgos implícitos en la participación privada, entre ellos los que se refieren a la posible pérdida del control de la Nación sobre una parte vital de sus recursos hidráulicos, así como aspectos de desequilibrio distributivo. Al respecto se concluye que el primero de los riesgos mencionados es fácilmente controlable dentro de nuestro marco jurídico y, respecto al segundo, que es necesario establecer un marco regulatorio idóneo, tanto para evitar el comportamiento monopólico en un sector que, por su naturaleza se presta a ello, como para asegurar los intereses de los diversos actores. De igual manera se señalan en forma breve los obstáculos existentes en nuestro país a la participación privada en el subsector, obstáculos que si bien son en buena parte exógenos a las empresas, pueden afectar el éxito de la participación privada. Por la importancia que tiene la existencia de ese marco regulatorio, en el séptimo apartado se presentan algunos conceptos relativos a las características deseables de ese marco.

Con el objeto de contrastar lo expuesto en los apartados anteriores con la realidad de nuestro medio, dedicamos esta parte a la exposición de casos de participación de las empresas privadas en el subsector de agua y saneamiento en nuestro país.

Finalmente, en el último apartado concluimos: *a)* que si bien ha habido contribuciones significativas de la iniciativa privada en este campo, las diversas circunstancias que se han dado en su evolución no han permitido que se concreten totalmente las expectativas que en su momento se tuvieron al respecto y *b)* que para una mayor contribución de las empresas privadas será necesario atender a diferentes aspectos de orden jurídico, reglamentario y de organización social, entre otros.

INTRODUCCIÓN

La participación privada en la prestación de diversos servicios no es un hecho reciente. En algunos países, particularmente en los que pueden considerarse de

economía de mercado o mixta esa participación tiene una larga historia. Baste con mencionar los casos de la Gran Bretaña, Francia y Estados Unidos. En México, a raíz de los cambios económicos generados en la segunda mitad del siglo XIX y hasta la década de 1920 es posible mencionar ejemplos en diversos sectores como transportes, generación de energía, riego agrícola y suministro de agua potable.

Sin embargo, es a principio de la década de los 80 del siglo pasado cuando puede considerarse que el concepto de privatización ha resurgido con intensidad, en una tendencia seguida por numerosos países, tendencia cuyo impulso puede asociarse a la política económica seguida entonces por la Gran Bretaña durante el gobierno encabezado por la Sra. Thatcher y, en un sentido más amplio, al impulso a la economía de mercado.

Es necesario puntualizar que el incremento de la actividad privada en la prestación de servicios que, en general en el ámbito mundial, se consideró normalmente en lo general y hasta fecha reciente como responsabilidad de los gobiernos, no se ha limitado a la privatización propiamente dicha, es decir a la venta de los activos correspondientes y con ella a la transferencia total de la responsabilidad en la prestación de los servicios relativos. La actividad privada incluye también otros esquemas que no constituyen una privatización en ese sentido pues no implican la venta de activos al sector privado. Suele denominarse a esos esquemas como “participación privada” e incluyen numerosas modalidades: desde la gestión de parte o la totalidad de la prestación de un servicio hasta modalidades que implican un cierto grado de riesgo financiero —que puede llegar a ser significativo— para las empresas privadas, tales como las de construir, operar, transferir y acciones similares,¹ pasando por el “arrendamiento”² de las instalaciones públicas y la concesión parcial o total de los servicios.

En lo que toca a las privatizaciones en sentido estricto y también en lo que se refiere a otros tipos de modalidades de participación privada, se discute cual ha sido la razón principal de los gobiernos que las han impulsado. El más comúnmente mencionado es el de la mayor eficiencia económica que pueden lograr las empresas privadas en comparación con las pertenecientes al sector público, por una serie de características que supuestamente las diferencian.

Sin embargo, la evidencia es que los gobiernos han tratado de cumplir diversos objetivos con los procesos de privatización. Entre esos objetivos puede incluirse el reducir el déficit financiero del sector público, no sólo por el ingreso derivado de la venta de sus activos, sino también al eliminar la carga que

¹ Tal es el caso de los nuevos esquemas de “contratos de servicios públicos” o “PPS”, concepto popularizado también en Inglaterra como un producto de la “tercera vía” y que se está analizando en nuestro país como un sustituto de los Pidiregas.

² El “*affermage*”, común en los servicios de agua en Francia.

implica el sostenimiento de empresas deficitarias, incluyendo el establecimiento de reglas de mercado en las relaciones entre las empresas por una parte y sus empleados y usuarios por otra. Parece claro que en nuestro país y en otros se ha dado esa mezcla de objetivos. Se ha tratado, por lo tanto, no solamente de inducir la competencia de mercado en sectores monopolizados por empresas públicas sino en ocasiones, algunas de ellas en forma prioritaria, de razones de orden financiero del sector público.

Por otra parte, desde el punto de vista de la eficiencia, aun existe el debate sobre si en muchos contextos, incluyendo desde luego el de las condiciones de monopolio natural, la propiedad y gestión privadas de las empresas responsables de la prestación de los servicios pueden, en realidad, conducir a una mayor eficiencia económica.

Entre los elementos de ese debate se cuenta la discusión sobre hasta qué grado la propiedad de los activos o de la responsabilidad por la utilización de los mismos para fines de servicio público determina los objetivos de los “propietarios”, públicos o privados de las empresas, al afectar los incentivos correspondientes y, por lo tanto, el comportamiento de la gerencia. Al respecto puede argüirse que los cambios de incentivos dependen en buena parte del contexto competitivo y regulatorio en el que se lleva a cabo la actividad de las empresas y que ese contexto tiene una influencia mayor en los incentivos que la propiedad, lo que señala la conveniencia de establecer instrumentos de regulación.

Es posible concluir que, si bien la existencia de empresas privadas con poder en el mercado tiende a incrementar la eficiencia interna, eso conlleva el riesgo de afectar negativamente la eficiencia distributiva, afectando a la parte de la población menos favorecida, a no ser que algunos de los efectos de la búsqueda de utilidad sean controlados a través de la existencia de restricciones regulatorias y de estructuras de mercado que estimulen la competencia.

Esa conclusión puede aplicarse no sólo a los casos de privatización, como se define en párrafos previos, sino también a ciertos casos de participación privada en los que no se da la transferencia de los activos al sector privado.

Por lo que toca a la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento en México, que constituyen el tema central de esta nota, el marco jurídico limita la posibilidad de privatización de los activos de los organismos responsables de prestar los servicios. En primer término, el artículo 115 de la Constitución establece con claridad que la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y tratamiento de las aguas residuales resultantes es responsabilidad exclusiva de los municipios.³ Por otra parte, si bien la mayor parte de las leyes

³ Como resultado de una política impulsada sobre todo a partir de la década de 1990, los servicios de agua potable y saneamiento en las poblaciones medias y mayores de nuestro país son prestados por organismos descentralizados de los municipios o estados. Esta política ha tenido como

estatales de agua da la posibilidad de que los municipios concesionen o contraten parte o la totalidad de esa prestación, también establecen que los activos necesarios, incluyendo desde luego la infraestructura son inalienables e inembargables. Sin embargo, hay diversas modalidades de participación privada, que no implican privatización, en los que pueden existir riesgos de ineficiencias de mercado o distributiva, dada la naturaleza monopólica de los servicios en el subsector.

En lo que sigue se tratan aspectos de la participación privada en los servicios de agua y saneamiento, tales como las diferentes modalidades comúnmente utilizadas, las posibles ventajas, desventajas y riesgos que puede implicar dicha participación en las condiciones particulares de nuestro país y la experiencia derivada de algunos casos concretos. Se analizan los obstáculos a que se enfrenta la participación privada en los servicios de agua y saneamiento y se plantean algunas medidas que pueden contribuir a una participación privada más exitosa. La nota concluye con una opinión sobre las perspectivas que dicha participación tiene en México.

PRINCIPALES MODALIDADES DE PARTICIPACIÓN DE EMPRESAS PRIVADAS

Las modalidades a través de las cuales se puede incorporar a la participación privada son muy diversas y pueden adquirir un gran número de matices. En lo que se refiere al alcance de los servicios y a las responsabilidades de la empresa privada, las modalidades van desde la contratación de servicios parciales, lo que se conoce también como “outsourcing”, hasta la privatización total, que incluye la venta de los activos y desde luego de la infraestructura y la responsabilidad total por la inversión futura y la operación de los sistemas, modalidad que como ya se expresó no es factible en nuestro país. Entre esos dos extremos existen diversos tipos de contratos y concesiones, así como esquemas tipo “construir-poseer-operar-transferir” (CPOT, comúnmente conocidos como BOOT por sus siglas en inglés: build-own-operate-transfer) y sus variantes, que se utilizan normalmente en el caso de elementos específicos de infraestructura, como pueden ser las plantas de tratamiento de aguas residuales o los sistemas de abastecimiento de agua en bloque.

En lo que se refiere a la propiedad accionaria de la empresa responsable de la prestación de los servicios, puede darse el caso de empresas cuyo capital sea totalmente privado o empresas de capital mixto. Otra de las formas por la cual un organismo público responsable del servicio puede hacer participar los sec-

objetivo crear verdaderas empresas públicas especializadas en la prestación de ese servicio. Como se verá más adelante, los avances en el sentido de la eficiencia interna de esos organismos han sido variables y, en muchos casos poco satisfactorios.

tores privado y social es mediante la implementación de esquemas de bursatilización.

En lo que respecta al alcance y responsabilidad de la empresa privada, las principales modalidades se resumen a continuación:

- Contrato de prestación de servicios parciales sin riesgo comercial.
- Contrato de prestación de servicios totales con riesgo comercial parcial.
- Contrato de prestación de servicios totales con riesgo comercial total (“arrendamiento”).
- Concesiones.
- Contratos CPOT (construir - poseer - operar - transferir) y sus variantes tales como:
 - COT (construir - operar - transferir).
 - CPO (construir - poseer - operar).
 - CAT (construir - arrendar - transferir).
- Contratos CPOT inversos.
- Privatización total (venta completa).
- Contratos para prestación de servicios con inversión en la infraestructura (También denominados proyectos para la prestación de servicios o “PPS”).
- Esquemas evolutivos (por ejemplo, de contratación de servicios hasta la concesión total).
- Coparticipación sector público - sector privado (empresas mixtas)
- Bursatilización, entendida como la colocación en el mercado de valores, de acciones de empresas públicas cuya constitución lo permite, mecanismo a través del cual se inyecta capital privado a la empresa. Esta es, por ejemplo, la forma en la que se ha dado la participación privada en Chile.

La brevedad de esta nota no permite detallar las características de las diferentes modalidades.⁴ Baste expresar que varían en el grado de responsabilidad y de riesgo adquiridos por la empresa privada, en el grado de autonomía, en los compromisos de inversión, en la duración de los contratos, en la propiedad de los activos y en la relación de la empresa privada con el usuario final de los servicios.

Para una participación privada satisfactoria es vital la selección de la modalidad mas adecuada para cada caso particular y para ello se deben tomar en cuenta las circunstancias políticas, legales y culturales de la localidad para las que se analice la participación privada, así como las características institucionales, financieras y técnicas del organismo público responsable de los servicios.

⁴ Para esos detalles véase, por ejemplo, el documento de la Comisión Nacional del Agua “La Participación Privada en la Prestación de los Servicios de Agua y Saneamiento. Conceptos Básicos y Experiencias”.

SITUACIÓN ACTUAL DE LOS SISTEMAS DE AGUA Y SANEAMIENTO

En el ámbito mundial la problemática de los servicios de agua y saneamiento es preocupante. En la actualidad, más de 1 000 millones de personas no cuentan con servicio de agua potable, 2 500 millones no tienen acceso a sistemas de alcantarillado y las descargas de más de 4 000 millones de personas no reciben ningún tratamiento.⁵ Los requerimientos de inversión para incrementar la cobertura de los servicios atendiendo las necesidades de una población creciente son muy considerables ya que una de las características de los servicios de agua y saneamiento es su alta demanda relativa de capital: mientras que la relación promedio entre activos fijos e ingresos anuales es de 3:1 en el sector de telecomunicaciones, y de 4:1 en el sector eléctrico, en el caso de los servicios que nos ocupan, dicha relación es de 10:1. Por otra parte, en muchos países, particularmente en los que están en vías de desarrollo, la eficiencia tanto en la utilización de la infraestructura existente como en los aspectos administrativos es baja, lo que a su vez incide negativamente en las posibilidades de mejorar los servicios.

Ante la evidente necesidad de evitar la acumulación de rezagos y de ampliar la cobertura de estos servicios vitales para la salud y para el mantenimiento del medio ambiente, a partir de la década de 1980, el renovado interés en la posible participación de las empresas privadas en la prestación de servicios públicos, incluyó a los de agua potable y saneamiento municipales. En la actualidad son numerosos los ejemplos que existen de esa participación, en todos los continentes, a través de diversas modalidades.

En lo que corresponde a nuestro país, es evidente que el considerable esfuerzo dedicado por las diferentes instancias de gobierno y la sociedad a la ampliación y mejoramiento de los sistemas de agua potable y saneamiento a lo largo de varias décadas, ha tenido avances relevantes hacia el logro de ese objetivo, a pesar del acelerado crecimiento demográfico.

Sin embargo, si bien se han tenido logros sustantivos, aún existen serias carencias en la cobertura de los servicios, así como en su calidad y eficiencia global. Las cifras disponibles indican que a fines del año 2001, de una población de 97.9 millones de habitantes, 10.7 millones carecían de servicio de agua potable y 22.6 millones no tenían acceso al alcantarillado⁶ y que la calidad de los servicios, particularmente en términos de continuidad, es deficiente en muchas localidades. A ello se aúna la baja eficiencia promedio, en lo físico y recaudatorio, de los sistemas. La situación es particularmente preocupante en las comunidades rurales.

⁵ Organización Mundial de la Salud, 2000.

⁶ Situación actual del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Comisión Nacional del Agua, diciembre de 2001.

Por lo que respecta al saneamiento se estima que 27% del total de aguas residuales que se captan en los sistemas de alcantarillado recibe algún tipo de tratamiento, sin que en muchos casos los efluentes alcancen la calidad proyectada.

Las metas del Programa Nacional Hidráulico, para el subsector de agua potable y saneamiento, en el escenario que se denomina sustentable proponen llegar en el lapso de 25 años a coberturas de 97% en los servicios de agua y alcantarillado y de 90% en los de tratamiento de aguas residuales municipales. Ello implica inversiones que, de acuerdo con diversas estimaciones tienen un monto promedio anual de entre 15 000 y 17 000 millones de pesos a precios del año 2000. Con el objeto de recuperar rezagos acumulados las inversiones propuestas son considerablemente mayores en los años iniciales del periodo 2000-2025: del orden de 25 000 millones de pesos anuales.

Estos requerimientos contrastan con la realidad financiera del subsector: a precios constantes, la inversión en 2001 fue del orden de 50% de la registrada en 1995.

De hecho, en la actualidad los recursos que se dedican a la inversión en el subsector en su conjunto son considerablemente menores a los que se requieren para alcanzar las metas mencionadas. Aún considerando estimaciones de las inversiones realizadas por los desarrolladores de vivienda y de los recursos del Ramo 33 (Fondo de Aportación para Infraestructura Social)⁷ que los estados y municipios probablemente dedican a obras de agua y saneamiento, el total de recursos destinados a inversión no superan 60% de lo requerido.

Desde luego, los generados por la recaudación que realizan los organismos municipales o estatales responsables de prestar los servicios operadores de los servicios, una vez descontados de sus ingresos los gastos de operación y del servicio de su deuda, representan un porcentaje menor respecto a los que demanda la expansión de la infraestructura. La aportación de los organismos operadores en ese sentido es del orden de 500 millones de pesos anuales, de acuerdo con un estudio reciente de la Comisión Nacional del Agua. Esta cifra integra, por una parte las correspondientes a un reducido número de organismos cuya situación financiera les permite dedicar recursos considerables a la inversión, en apoyo a subsidios federales y estatales y por otra, las relativas a la mayor parte de los organismos, que con dificultades cubren sus costos de operación y mantenimiento y en donde la posibilidad de inversión depende fundamentalmente de subsidios⁸ que son, en esencia, los que el Gobierno Federal aporta al gasto de inversión de los sistemas de agua y saneamiento a través de diferentes programas, más la contraparte de los gobiernos estatales y municipales.

⁷ No existe información confiable respecto a éstas estimaciones, por lo que no se incluyen en las cifras oficiales.

⁸ En promedio, durante los últimos años a partir de 1995, los subsidios federales y estatales al subsector han representado 75% de la inversión.

Por otra parte, la política nacional es explícita en lo que se refiere a la reducción de subsidios⁹ y a la necesidad de que los servicios de agua y saneamiento en las áreas urbanas¹⁰ sean autosuficientes en el menor plazo posible. Así, el Programa Nacional Hidráulico establece, entre sus lineamientos estratégicos que:

- Se fomentará el desarrollo de organismos operadores capaces de proporcionar los servicios en forma autosustentable.
- La inversión necesaria para abatir los rezagos de los servicios y satisfacer nuevas demandas tendrá que provenir, crecientemente del pago de los usuarios por los servicios. Los subsidios federales y estatales que no se justifican en términos sociales y económicos tenderán a eliminarse progresivamente.

Pero en la actualidad, como ya se mencionó, la situación financiera promedio de los organismos operadores es precaria. Ello es resultado de las bajas eficiencias físicas, operativas y comerciales, y a las políticas tarifarias, que en la mayor parte de los casos establecen cuotas que no representan el costo total de los servicios. Además, en la mayoría de las localidades no se generan flujos de caja suficientes para servir cabalmente su deuda y, desde luego, para enfrentar nuevas inversiones en infraestructura, insuficiencia que se cubre normalmente con subsidios.

Así, la falta de recursos económicos y técnicos impide lograr niveles de eficiencia que, de alcanzarse y estabilizarse, aunados a tarifas adecuadas, darían a su vez acceso a dichos recursos y que es imprescindible y urgente romper los círculos viciosos que afectan a los sistemas de agua y saneamiento y que impiden su sano desarrollo. Algunos elementos de esos círculos viciosos, que guardan estrecha relación entre sí, son:

- Falta de continuidad de los programas debido, principalmente, a la alta rotación de los cuadros directivos, técnicos y administrativos en los organismos operadores.
- Altos requerimientos de inversión, generalmente superiores a los recursos disponibles. Disminución de fondos fiscales.
- Deficiente cultura del agua.
- Marco jurídico y regulatorio inadecuado.
- Intensa politización de las decisiones en el subsector.
- Tarifas insuficientes.

⁹ Bien puede tratarse de un caso de “hacer de la necesidad, virtud” dada la situación de las finanzas del Gobierno Federal.

¹⁰ La política para las localidades rurales implica el mantenimiento de subsidios en largo plazo, procurando la autosuficiencia en lo que se refiere a la operación y mantenimiento.

Todos esos elementos afectan a los organismos responsables de la prestación de los servicios, originando:

- Baja eficiencia física y operativa de los sistemas, lo que produce altos costos.
- Deficientes niveles de servicio.
- Poca disposición al pago; baja eficiencia en facturación y cobranza.
- Altos índices de endeudamiento.
- Bajo índice de aprovechamiento de la infraestructura, particularmente en el caso de plantas para tratamiento de aguas residuales.

Esta situación se deriva de la interrelación de diversos factores de orden económico, político y cultural y su solución requiere de acciones en diferentes sentidos. En este contexto es válido analizar todas las posibilidades de reforzar al subsector de agua y saneamiento en el país en todos los aspectos: técnicos, administrativos, de cobertura y calidad de servicios y, desde luego, en lo financiero. Una de las opciones evidentes es la participación privada en sus múltiples modalidades.

POSIBLES CONTRIBUCIONES DE LA PARTICIPACIÓN PRIVADA

La participación de las empresas privadas en el sector de agua y saneamiento puede ser útil por diversas razones.

La que normalmente se menciona en primer término es que esa participación implica una fuente adicional de recursos financieros. En ese sentido se plantea que la canalización, hacia las ciudades medias y mayores, de recursos financieros privados representaría un factor importante, particularmente en lo que se refiere a la inversión en los diferentes componentes de la infraestructura necesaria, pero también en lo que toca al logro de una mayor eficiencia. Como resultado de ello, los recursos limitados del sector público podrían aplicarse a apoyar y a dar asistencia a los sistemas de las localidades con menor capacidad de pago, con énfasis en las comunidades rurales, en donde se tienen los rezagos más preocupantes de servicios.

Este aspecto se subraya en el caso de proyectos específicos que requieren una inversión considerable en una obra concreta y en los que la empresa privada toma a su cargo la operación y mantenimiento de esa obra durante un periodo predefinido. Tal es el caso, por ejemplo, de los esquemas construir-operar-transferir, que cuenta con numerosos ejemplos en nuestro país o el de los "contratos de servicios públicos" que actualmente se analizan como una opción interesante.

Pero además de la aportación de recursos financieros adicionales, se considera que la participación directa de los particulares en la administración de los

sistemas municipales de agua puede ser útil en aspectos, también relevantes y en algunos casos tan importantes o más que la aportación financiera:

- Da acceso a recursos técnicos, administrativos y operativos que contribuyen al incremento de la eficiencia global, así como una experiencia orientada específicamente a la eficiencia operativa, calidad de los servicios y racionalidad económica.
- Permite agilidad en la toma de decisiones y la asignación de recursos, lo que incide directamente en la eficiencia operativa y como resultado, en la calidad de los servicios y el mejoramiento de la situación financiera.
- Proporciona continuidad y estabilidad en las funciones técnica y administrativa, así como a los procesos de planeación, ejecución y control, al ser ajena a los efectos de los cambios inherentes a la escasa duración de la gestión municipal.
- Permite la separación explícita entre las funciones de autoridad y regulación, que corresponden a la autoridad concedente, de las directamente vinculadas con la prestación de los servicios, que corresponden al concesionario.

De hecho, es muy posible que en muchos casos las aportaciones más relevantes de la empresa privada en el mediano y largo plazo estén en estos aspectos relacionados con la eficiencia, la continuidad de la gestión y la diferenciación entre el papel operativo y el de regulación y supervisión. En efecto, de lograrse esto, se darían pasos fundamentales para romper los círculos viciosos que afectan al subsector, lo que contribuiría también a solucionar las dificultades financieras. Es claro que una organización, pública o privada, que logre un desarrollo que asegure por cualquier medio la eficiencia comercial y operativa y una política tarifaria adecuada, tendrá un flujo de efectivo tal que no habrá dificultades para financiar sus inversiones.

A favor de la participación privada en nuestro país pudiera argüirse que, en muchos casos, por razones que fundamentalmente son de orden jurídico y político, no es fácil que en el corto plazo los organismos municipales responsables por la prestación de los servicios cumplan con las características que se señalan más arriba y que podrían llevarlos a la autosuficiencia financiera.

Pero por diversas razones, con frecuencia la participación privada tampoco puede lograr esa autosuficiencia en el corto plazo, tal como lo muestran los pocos casos de participación privada integral que se han dado en nuestro país. También cabe mencionar el caso de Argentina, en donde, en Buenos Aires, se tiene uno de los casos más importantes de participación privada a través de una concesión que incluye inversiones considerables en la expansión de la infraestructura. En la actualidad el gobierno analiza un nuevo diseño de acuerdo con el cual se crearían fondos fiduciarios con los cuales se financiarían las futuras obras de

expansión. El Estado administraría esos fondos y, con base en sus prioridades definiría las obras por realizar, dejando la operación a las empresas concesionarias, liberándolas de hacerse cargo de ampliaciones a la infraestructura no previstas en la actualidad. Este esquema se relaciona con la necesidad de buscar equidad en las inversiones y una adecuada distribución de riesgos, tema que se trata en el apartado siguiente de esta nota. De hecho, se trata de un caso en el que el sector público toma a su cargo una parte substancial de las inversiones y la empresa privada, que también participa en las inversiones, tiene como responsabilidad esencial el logro de la eficiencia comercial y operativa.

RIESGOS INHERENTES A LA PARTICIPACIÓN PRIVADA

En contrapartida a sus posibles aportaciones, la participación privada no está exenta de riesgos.

Uno de ellos, de carácter claramente estratégico, se refiere a que, a través de la participación privada el control de los recursos hidráulicos pase gradualmente del sector público al sector privado, particularmente en los casos de concesión total de servicios.¹¹ Esto no es posible desde el punto de vista jurídico. El artículo 27 de la Constitución Política es explícito en ese sentido, pues establece que las aguas superficiales del país son propiedad de la Nación y, en lo que toca a las subterráneas que éstas, si bien pueden ser libremente extraídas y apropiadas por el dueño del terreno, están sujetas a reglamentación y a veda por parte del Ejecutivo Federal.

Por lo que toca a la utilización del agua por parte de otras instancias distintas al Ejecutivo o por los particulares, es claro que en ningún caso podrán considerarse como propietarios del agua, sino solamente como usuarios: “El dominio de la Nación sobre el agua es inalienable e imprescriptible. Su explotación, uso o aprovechamiento no podrá realizarse sino mediante concesiones otorgadas por el Ejecutivo Federal, de acuerdo a las reglas y condiciones que establecen las leyes”, en este caso la Ley de Aguas Nacionales.

Sin embargo, es necesario asegurarse de que la participación privada en los servicios de agua y saneamiento, de ser masiva a través, por ejemplo de la concesión de los mismos a grandes empresas internacionales, no resulte en situaciones de monopolios no regulados o a la creación de oligopolios que incluso podría conducir a carteles, que entonces podrían influir en alguna forma en la política hidráulica del país. Una correcta aplicación del marco jurídico existente debe asegurar que esto no ocurra. También convendrá estimular la creación de

¹¹ Como ya se mencionó, el caso de la privatización total de los servicios no se considera factible en el marco jurídico actual del país.

empresas privadas, netamente nacionales dedicadas específicamente a la operación eficiente de servicios de agua en ciudades de tamaño medio, con el objetivo de crear las condiciones que conduzcan eventualmente a situaciones en las que la contratación de financiamientos en condiciones favorables no constituya un problema. Existen en el país los cuadros técnicos y administrativos para crear ese tipo de empresas.

Existen, además, riesgos de carácter operativo, algunos de los cuales pueden afectar a empresas tanto públicas como privadas, pero cuyos efectos en última instancia se hacen sentir en el actor más importante, aunque normalmente silencioso, que es el usuario. Algunos de esos riesgos se relacionan directamente con los incentivos de la empresa privada que se plantearon en la introducción:

- Acceso de la totalidad de la población a los servicios: que la empresa privada, en la búsqueda de maximización de sus utilidades, pueda inclinarse a no prestar servicios en zonas en donde la introducción de la infraestructura tiene un costo alto o en donde la baja capacidad económica de la población puede afectar los ingresos de la empresa. De hecho ese es uno de los aspectos que más frecuentemente se señalan como deficiencias de la participación privada y que ha llevado a que recientemente el Banco Mundial, impulsor importante de dicha actividad, señale que la participación privada no está exenta de problemas y que no es conveniente sostener la posición extrema de que el sector privado debería encargarse de todo.
- Nivel de servicio: que los servicios proporcionados por el sector privado no sean de la calidad deseada, al no tener la empresa capacidad o motivación para cumplir las metas comprometidas en el título de concesión o contrato.
- Costo: que los costos de dichos servicios para el usuario sean mucho mayores que los del organismo público, como resultado de fallas del concesionario o de desviaciones importantes en las condiciones económicas y financieras exógenas al proyecto.¹²
- Aspectos comerciales: este riesgo puede presentarse en proyectos con riesgo comercial. Está asociado por ejemplo, al costo de insumos del proyecto (un ejemplo es el incremento de costos financieros, recurrentes hasta recientemente en el país). Se asocia también a la falta de cultura de pago y a la dificultad, jurídica o de realidad política, que existe para estimular a los usuarios al cubrir las tarifas que en muchos casos no cubren el costo de los servicios, aún en condiciones de eficiencia operativa.¹³

¹² El costo del financiamiento del sector público es normalmente menor que del financiamiento privado. Desde este punto de vista, sin tomar en cuenta los costos de oportunidad, la justificación de la participación privada estaría en otros aspectos: mayor eficiencia, continuidad de la gestión, etc.

¹³ Con frecuencia, a falta de subsidios o de esquemas de responsabilidad compartida, la em-

- Aspectos financieros: están asociados a los posibles riesgos de mercado que se derivan de las diferencias entre el comportamiento de las variables financieras que se suponen al analizar el proyecto y fondearlo, y las que en realidad ocurren a lo largo de sus diferentes etapas. En general se consideran dentro de estos riesgos las variaciones no previstas en los niveles de inflación, tipo de cambio y tasa de interés.
- Políticos: cambios de política, nacionalización o expropiación, afectación de intereses de grupos locales, embargo, bloqueo comercial, entre otros.
- Técnicos: tecnología no adecuada, fallas en el diseño; desviaciones en tiempo, costo y calidad en la etapa de construcción; falla en el funcionamiento de equipos e instalaciones, capacidad de producción y eficiencia menor a lo esperado y desviaciones en los costos de producción durante la etapa de operación, son los principales riesgos asociados al aspecto técnico.

La participación privada satisfactoria estará condicionada en buena medida al grado en que los riesgos mencionados puedan identificarse, cuantificarse y mitigarse. Para ello se requiere un cuidadoso análisis, en las etapas iniciales, de los riesgos inherentes a cualquier esquema de participación privada. En la mayoría de los casos, los riesgos mencionados pueden controlarse a través de una distribución adecuada de los mismos entre los diversos actores, apoyada en la existencia de garantías mutuas, de la selección de una modalidad apropiada de participación privada, de un proceso transparente de licitación y asignación de contratos o títulos de concesión y, aspecto de capital importancia, de la adopción de un proceso adecuado de regulación.

Un aspecto no analizado suficientemente es que, por razones de orden contractual y político, normalmente los procesos de prestación de servicios a cargo de una empresa privada tienen una mayor visibilidad que los prestados por un organismo público, lo que debería inclinar a la empresa privada a una mejor ejecutoria. Pero, si bien es muy común el caso de deficiencias operativas de los servicios prestados por los organismos públicos, su evidencia puede paliarse en la mezcla de responsabilidades operativas y supervisorias en la estructura del sector público; además, tal vez como efecto de una tradición de servicios prestados por el sector público a bajos costos,¹⁴ la actitud de la sociedad suele ser menos crítica respecto a las deficiencias operativas de sus organismos. Esto implicaría falta

presa privada sólo puede subsistir con un incremento de tarifas que difícilmente es aceptado por la población.

¹⁴ Con frecuencia se olvida o se omite mencionar que, en último análisis, sin tomar en cuenta la posibilidad de donativos, poco frecuentes, cualquier acción del sector público sólo es realizable con base en los impuestos pagados por individuos o empresas o por las tarifas que se cobran directamente a los usuarios.

de estímulo a la mejora de los servicios. Sin embargo, por ejemplo, en el caso de crisis financieras severas, ocasionadas por causas de orden interno o exógeno, es posible que la empresa pública encuentre una mayor flexibilidad en el sistema para hacer los ajustes necesarios en un plazo relativamente breve (transferencias, subsidios, etc.). Esto, que desde el punto de vista de eficiencia económica es negativo, puede ser favorable desde el punto de vista social, incluyendo la continuidad de la prestación de los servicios a los usuarios.

OBSTÁCULOS A LA PARTICIPACIÓN PRIVADA

Independientemente de los riesgos que conlleva la participación privada en los sistemas de agua y saneamiento, también existen obstáculos ajenos a las empresas, que deben tomarse en cuenta al analizar las posibilidades de su participación y que, en su caso, es necesario allanar, considerando que la transferencia de la prestación de los servicios de un organismo público a una empresa privada es un proceso que puede enfrentar diversas complicaciones y obstáculos de distinta índole:

- Jurídicos: legislación y marco regulatorio inadecuados, ausencia de mecanismos adecuados de resolución de conflictos.
- Desconfianza hacia el sector privado. Opinión pública desfavorable.
- Sociales: oposición seria al proyecto a lo largo de su desarrollo.
- Falta de un marco de referencia derivado de una experiencia nacional madura en este campo.
- Resistencia ante lo que puede considerarse como pérdida de control por parte del sector público, lo que en ocasiones se relaciona con el temor de la posible afectación a intereses creados.
- Tendencia a utilizar el tema de las decisiones sobre la prestación de servicios públicos como un arma de coyuntura político electoral.
- Con frecuencia, necesidad de enfrentar la responsabilidad de promover e implantar una nueva política tarifaria que implique incremento de los costos para el usuario.
- Necesidad de enfrentar y resolver posibles problemas laborales derivados de la transferencia de ciertas responsabilidades, de un organismo público a una empresa privada.

Es claro, o debería serlo que, con independencia de las posibles aportaciones privadas, habrá casos en los que la imposibilidad práctica de resolver esas cuestiones anulen la viabilidad de esa participación. De hecho ese es un caso que se ha dado en muchas ocasiones, tanto en nuestro país como en otros.¹⁵

¹⁵ Tal es el caso, por ejemplo, de Cochabamba en Bolivia o Tucumán en Argentina.

UN CONCEPTO DE REGULACIÓN

Uno de los elementos que comúnmente se considera como fundamental para lograr un nivel satisfactorio de servicios públicos, muchos de ellos de carácter monopólico, es la existencia de un marco regulatorio que propicie el equilibrio de los intereses de los diferentes actores incluyendo, desde luego, el control de posibles acciones monopólicas. También se considera que este elemento debe existir, independientemente de que los servicios sean prestados por una empresa pública o una empresa privada. Sin embargo, en muchos países, entre ellos México, las discusiones sobre este tema se originan esencialmente a partir de la presencia de las empresas privadas en la prestación de servicios.

Se entiende como regulación el control que ejerce el sector público sobre las actividades de una empresa que produce un bien o servicio público, sea ésta de naturaleza pública, privada o mixta. La regulación es necesaria cuando los servicios que presta la empresa son de carácter monopólico o cuando se presentan otro tipo de fallas de mercado. Tal es el caso de los servicios de agua y alcantarillado, ya que el servicio puede ser prestado en forma más económica para los usuarios por un sólo proveedor, pues el alto costo de la infraestructura necesaria excluye la presencia de más de un prestador de dichos servicios.

En este caso se pueden presentar y de hecho se presentan, situaciones que es necesario evitar: establecimiento de tarifas más elevadas que las que se fijarían en una situación competitiva o de regímenes tarifarios que no permiten la recuperación de las inversiones y costos de operación necesarios para prestar servicios de una calidad adecuada; así como prestación de servicios de una calidad inferior a la que podría obtenerse en condiciones de competencia.

Actualmente se considera que para el correcto funcionamiento de los sistemas de agua y saneamiento, es necesario tener una separación explícita de responsabilidades, de modo que:

- El gobierno dicta las políticas generales del servicio a través de leyes y reglamentos.
- Un organismo operador, público, privado o mixto se encarga de la prestación de los servicios a la población.
- Un órgano regulador establece normas detalladas, se encarga de la vigilancia de que esas normas se respeten y actúa como árbitro en la solución de conflictos entre los participantes.

Estos conceptos son válidos tanto si los servicios son suministrados por un organismo público como si son delegados a una empresa privada. Es necesario subrayar que la propiedad y operación de los sistemas por parte de una instancia de gobierno, no es garantía de que se limite el poder monopólico, ya que también

en este caso el organismo operador podrá inclinarse a cobrar precios excesivos o insuficientes, o a solicitar subsidios más allá de lo necesario, o a prestar servicios de baja calidad.

Al respecto, un análisis de los marcos regulatorios de diversos países latinoamericanos muestra que en la gran mayoría de ellos la regulación se aplica tanto a las empresas públicas como a las privadas o mixtas en localidades con número de habitantes superior a un mínimo.

Ya sea que los servicios sean prestados por un órgano público, privado o mixto, el marco regulatorio tiene la función de equilibrar y proteger los intereses de los diferentes actores.

- *Consumidores*: protegiéndolos de tarifas excesivas y de la mala o deficiente calidad del servicio, así como procurando el acceso de toda la población a los servicios.
- *Empresas operadoras*: dándoles la posibilidad de administrar los servicios con base en criterios de eficiencia, sin interferencias políticas indeseables.
- *Inversionistas*: protegiéndolos en contra de la expropiación del capital invertido en forma directa —al no indemnizar adecuadamente— o indirecta —al no reconocer el costo real de los servicios prestados—.
- *Gobierno*: Contribuyendo al cumplimiento del objetivo fundamental de procurar servicios de calidad a toda la población a un costo adecuado y asegurando que el órgano regulador, que de hecho es su delegado, cumpla sus funciones satisfactoriamente.

Normalmente, un marco regulatorio de los servicios de agua y saneamiento suele referirse a: la regulación económica, especialmente a la fijación de las tarifas de los servicios; la regulación de la calidad de los servicios, que incluye aspectos tales como la calidad del agua suministrada, la oportunidad y la continuidad, la respuesta oportuna a las solicitudes justificadas de los usuarios, entre otros aspectos; y la mediación en el caso de conflictos que se presenten entre los diferentes actores. La responsabilidad por el cumplimiento de otros aspectos, tales como las normas ambientales, por lo general recae en instancias diferentes.

Son de particular importancia en las posibilidades de implantar un marco regulatorio adecuado las atribuciones que las disposiciones jurídicas vigentes asignan a los tres ordenes de gobierno, federal, estatal y municipal en lo que se refiere a los sistemas de agua y saneamiento.

En el caso de nuestro país, hay que subrayar la disposición constitucional que, en su artículo 115, asigna al municipio la responsabilidad por la prestación de los servicios, con un papel limitado por parte de otras instancias de gobierno.

Se han dado diversas interpretaciones a lo establecido en el Art. 115, algunas de ellas en el sentido de que los gobiernos estatales podrán tener injerencia li-

mitada en todo lo que se refiere a la prestación de los servicios públicos y otras que sostienen que si bien los municipios deberán tener libertad para prestar dichos servicios, deberán hacerlo en el contexto y siguiendo lo establecido en la legislación estatal. Sin embargo, aparentemente una mayoría de las entidades del país se han inclinado a la primera de esas interpretaciones, pues o bien eluden el tema de regulación o lo tratan en términos demasiado generales, particularmente en lo que se refiere a la componente de supervisión.

Es evidente que la posibilidad de establecer un marco regulatorio adecuado de los servicios de agua y saneamiento en las entidades de la República, deberá basarse en una interpretación del marco jurídico vigente, que sea aceptada tanto por el Estado como los municipios y que reconozca que es necesario establecer normas y mecanismos generales que sirvan de base para el mejor funcionamiento de dichos servicios. Este es un asunto al que debe dársele la mayor importancia.

La ausencia prácticamente total en nuestro país de marcos regulatorios que respondan a las características descritas implica, por una parte, una marcada debilidad en los instrumentos para la defensa del usuario de los servicios y, por otra, un obstáculo a la participación privada al existir falta de precisión jurídica especializada y la posibilidad de decisiones casuísticas.

CASOS DE PARTICIPACIÓN PRIVADA

En el mundo

Existen en el mundo múltiples ejemplos de participación privada. En Inglaterra, por ejemplo, a partir de 1989 se inició el proceso de privatización total de los sistemas; en Chile la participación de empresas privadas en la modalidad de contratos de servicios es una práctica común desde hace años y más recientemente en dicho país, se ha venido utilizando la burzatilización como un mecanismo a través del cual se puede introducir la participación de empresas privadas, tanto en la inversión como en la operación de los servicios. En Francia y España, son comunes los contratos de arrendamiento, así como los de concesión; ejemplos más recientes de este tipo de contratos se han dado en Alemania, Argentina, Australia, Chile, Colombia, Costa de Marfil, México y Puerto Rico. Los esquemas tipo construir-operar-transferir son muy comunes en numerosos países en todo el mundo.

En términos generales dichos proyectos han contribuido en forma sustancial al mejoramiento de los servicios de agua y saneamiento en sus respectivos países. Sin embargo, también ha habido fracasos sonados y casos de éxito parcial, debido al manejo inadecuado de los riesgos y obstáculos que se mencionan más arriba en esta nota.

En México

La participación de empresas privadas en la prestación de los servicios de agua en México, se inicia propiamente a partir de la década de los ochenta. Esta participación se ha dado en diversos aspectos de los sistemas de agua, particularmente en la administración parcial o total de los sistemas, y en la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

En lo que corresponde a la participación de empresas en la administración integral de sistemas, se han registrado a la fecha cuatro casos de los cuales dos son de concesión total: Aguascalientes y Cancún, uno de contrato de prestación de servicios: Navojoa, y un caso de empresa mixta: Saltillo. Existió un caso más de contrato de prestación de servicios: Nogales, el cual fue adjudicado a fines de 1997, pero a la fecha no ha podido iniciar formalmente operaciones por problemas de tipo contractual. En estos casos cada empresa privada tiene a su cargo la administración integral del sistema incluyendo la cobranza a los usuarios, así como la obligación de realizar obras de rehabilitación y ampliación de la infraestructura. La empresa privada se compromete además a incrementar los niveles de eficiencia del sistema en su conjunto.

Por lo que respecta a la participación privada en la administración de los sistemas a través de contratos de prestación de servicios parciales, los casos más relevantes son los del Distrito Federal y el de Puebla. En el primero, se eligió un modelo de prestación de servicios en diferentes etapas, con responsabilidad creciente de 4 empresas seleccionadas a través de un concurso, las cuales participan en diferentes conjuntos de Delegaciones; de acuerdo con este modelo al final del proceso dichas empresas se encargarían, en una modalidad análoga a la de arrendamiento, de la totalidad de los servicios de distribución, medición, facturación y cobranza, así como de la operación, rehabilitación y mantenimiento de las redes secundarias de agua potable y alcantarillado, sin que a la fecha se haya logrado esa evolución. En el caso de Puebla, se eligió un contrato de prestación de servicios que incluye exclusivamente la realización de acciones relacionadas con el área comercial. La empresa tiene a su cargo el proceso de facturación, medición y cobranza a los usuarios.

A continuación se hace una breve reseña de la evolución y resultados a la fecha de los proyectos de Aguascalientes, Cancún, Ciudad de México y Puebla.

Concesión integral en la ciudad de Aguascalientes, Ags.

Este proyecto es uno de los de mayor relevancia en la incorporación de una empresa privada en la prestación de los servicios de agua en forma integral (extracción, distribución y tratamiento). El proyecto se inicia en 1989, año en que la Comisión de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Municipio de Aguascalientes (CAPAMA), firma un contrato parcial de servicios de corto plazo

(tres años) que incluyó fundamentalmente la realización de acciones para incrementar los niveles de la eficiencia comercial a través de instalación de medidores y la instrumentación de acciones para aumentar la facturación y los niveles de cobranza. El contrato fue asignado, sin mediar un proceso de licitación.

Dada las necesidades urgentes de llevar a cabo obras de rehabilitación y ampliación de la infraestructura, en octubre de 1993, las autoridades decidieron concesionar la prestación de los servicios de manera integral por un periodo de 20 años a una empresa perteneciente al mismo grupo al que perteneció la contratista original.

Durante el primer año de operación la concesión se desarrolló conforme lo programado con desviaciones mínimas; sin embargo, a partir de enero de 1995 los costos de operación y las tasas de interés de los créditos contratados se incrementaron considerablemente como resultado de la situación financiera que se dio en nuestro país durante dicho año, sin que fuera posible aumentar las tarifas en un monto suficiente, lo que llevó eventualmente al rescate de la concesión por parte del concedente, teniendo como base causa de utilidad pública. Ello puso en evidencia ciertas carencias en el título de concesión el que no disponía de adecuados esquemas de resolución de controversias y de un marco jurídico regulatorio que protegiera los intereses de todos los participantes, incluyendo a los usuarios del servicio.

En octubre de 1996 el Congreso del Estado aprobó un conjunto de modificaciones al Título de Concesión. Se llegaron además a diversos acuerdos, uno de los cuales era la necesidad de capitalizar el proyecto con aportaciones de los participantes.

En la actualidad, después de una nueva capitalización de la empresa, la situación financiera se ha visto favorecida por recuperación de la cartera vencida y por la canalización de subsidios para la construcción de infraestructuras, subsidios que deberán ser sólo temporales en tanto se logre el equilibrio financiero de la concesión.

Por lo que respecta al nivel de prestación de servicios, desde el punto de vista de la concesionaria, se han tenido logros sustanciales en diferentes aspectos técnicos, particularmente en lo que se refiere a la cobertura de los servicios de agua potable, que en la actualidad es de 99% en las áreas urbanas, en la instalación de medidores, así como en aspectos administrativos, de atención a los usuarios y de cultura del agua. Sin embargo la autoridad juzga que se tienen retrasos en el cumplimiento de metas relacionadas con la eficiencia física y comercial y en la cobertura de servicios en las comunidades rurales.

También, de acuerdo con la autoridad concedente, el proyecto se hubiera beneficiado de un proceso de licitación que hubiera mejorado la competitividad y sería preferible separar algunos aspectos como el suministro de agua en bloque.

Concesión integral de los servicios en la ciudad de Cancún

El proyecto de la ciudad de Cancún constituye otro proyecto de gran importancia en la participación de una empresa privada en la prestación de los servicios de agua de manera integral. Los antecedentes de este proyecto se inician a fines de 1990, fecha en la cual la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo (CAPA) celebró un contrato administrativo para la compra-venta de agua en bloque, con la modalidad de inversión recuperable, en infraestructura hidráulica, para el sistema de agua de Cancún, Nizuc e Isla Mujeres.

A fines de 1993 el Gobierno Estatal, la CAPA y los municipios de Benito Juárez e Islas Mujeres, con base en la experiencia adquirida a través del proyecto de abastecimiento de agua en bloque, invitaron a cuatro firmas privadas a presentar ofertas para la operación, mantenimiento y expansión de los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento, sin que mediara un proceso formal de licitación. A partir de la asignación correspondiente una empresa privada se encarga de la operación del sistema de agua en forma integral.

En forma similar al proyecto de Aguascalientes, el de Cancún ha enfrentado diversas circunstancias que han impedido que el proyecto se desarrolle de acuerdo a lo programado. Entre esas circunstancias se mencionan las cuatro siguientes: la falta de información a la firma de la concesión de los diferentes componentes del sistema, que hicieron plantear metas de incrementos de cobertura y de eficiencias extremadamente optimistas; la crisis financiera de 1995; la dificultad para obtener créditos; el retraso que se tuvo en aprobar oportunamente las nuevas tarifas por parte de la autoridad responsable, la postura temporal de no pago de los hoteleros de la zona como reacción a la aplicación de esas tarifas. Cabe destacar que las tarifas no se incrementaron en términos reales durante los primeros nueve años y en el último año sólo se incrementaron 3% real promedio.

El impacto del retraso del pago sobre los ingresos de la concesionaria fue muy importante dado que el monto de la facturación por cobro a los hoteles representaba en ese entonces casi tres cuartas partes de los ingresos totales. En forma paralela, los usuarios domésticos registraban altos índices de morosidad por la imposibilidad de la concesionaria de suspender el servicio por no pago.

La anterior situación inició un largo proceso de negociación que, ante la imposibilidad de ser dirimidas satisfactoriamente entre las partes, condujo al Ejecutivo Estatal a intervenir, en el mes de agosto de 1996, las oficinas generales de la concesionaria.

La intervención estatal ocasionó que los participantes entraran en una etapa de renegociación de la concesión, en la que participaron activamente diversas instancias del Gobierno Federal, entre ellas la CNA y Banobras; la primera como conciliador y asesor jurídico y, la segunda, como asesor financiero.

En febrero de 1997, se firmó un convenio de transacción en el cual participaron el Ejecutivo del Estado, los Municipios y la empresa concesionaria. En di-

cho convenio las partes se comprometieron a llevar a cabo una serie de acciones de carácter técnico, jurídico, económico y financiero, así como el establecimiento de un nuevo título de concesión el cual fue firmado en el mes de febrero de 1999. Sin embargo el convenio no incluyó la creación de un órgano regulador independiente.

En lo técnico y administrativo los principales logros de la concesionaria se refieren a la cobertura de los servicios: 100% en agua potable, 83% en alcantarillado, 100% en el tratamiento de las aguas residuales recolectadas, lo que ha implicado inversiones substanciales de la empresa, del orden de 100 mdd en los últimos 10 años.

Contrato de prestación de servicios de la Ciudad de México

El proyecto del Distrito Federal (Ciudad de México) se constituye cronológicamente en el tercer caso importante de incorporación de la empresa privada en la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y el tratamiento.

El proyecto de participación privada tuvo sus inicios cuando en el mes de noviembre de 1992, el Departamento del Distrito Federal por conducto de la CADF, determinó contratar diversos servicios para realizar, por conducto de terceros, en forma progresiva y, a requerimiento expreso del propio Departamento, diversas actividades, a efecto de reducir el volumen de agua extraída, ampliar las redes secundarias y mejorar su mantenimiento y conservación, así como incrementar la recaudación de derechos.

La CADF convocó a los interesados a participar en la licitación pública para presentar ofertas para contratar con el Departamento, a través de la CADF, la prestación de diversos servicios profesionales y técnicos. Para la elaboración de estos trabajos y dada la magnitud del Distrito Federal y a fin de incentivar la competencia entre los posibles ganadores de los contratos, el Distrito Federal fue dividido en cuatro zonas de importancia. De acuerdo a la convocatoria los trabajos se llevarían a cabo en tres etapas.

En la primera, se desarrollarían actividades de: *a)* levantamiento del padrón de usuarios; *b)* regularización de medidores y tomas que incluía actividades como el suministro de medidores e instalación y *c)* el levantamiento del catastro de la red secundaria de agua potable y drenaje. En la segunda etapa se ejecutarían trabajos de procesamiento de nuevas solicitudes de servicios e instalación de nuevas tomas.

En la tercera etapa se realizarían actividades relacionadas con el suministro e instalación de macromedidores y la identificación de la adecuación de la red secundaria para optimizar la macromedición y, en su fase final a la operación del sistema de distribución, a la detección y reparación de fugas, el desazolve de la red y el mantenimiento, rehabilitación y ampliación de las redes.

Las bases de licitación establecían que una vez concluidos estos trabajos las empresas se encargarían bajo una modalidad análoga a la de arrendamiento, de la totalidad de los servicios de distribución, medición, facturación y cobranza, así como de la rehabilitación y mantenimiento de las redes de agua potable y alcantarillado.

En el mes de marzo de 1993, la CADF emitió fallo a favor de cuatro empresas mexicanas, en sociedad con igual número de empresas extranjeras, para lo que se firmarían contratos de prestación de servicios a través de los cuales se establecerían los términos y condiciones para llevar a cabo los trabajos descritos con anterioridad.

Al igual que en los casos de Aguascalientes y Cancún, estos proyectos se vieron fuertemente afectados por la crisis económica financiera que vivió nuestro país a principios de 1995. La devaluación del peso con respecto al dólar impactó fuertemente los costos de los proyectos, ya que muchos de los equipos eran de procedencia extranjera lo que afectó costos y por lo tanto los precios unitarios ofrecidos en un principio.

Por otro lado, el desarrollo de los proyectos se ha visto afectado al no haberse transferido oportunamente hacia la CADF las funciones de otras dependencias involucradas con el servicio de agua, para que ésta a su vez pudiera asignar los trabajos correspondientes a sus contratistas, situación que ha limitado el cumplimiento de metas conforme a lo acordado.

A la fecha no se han podido iniciar los trabajos de la tercera etapa y por lo tanto el desarrollo de los proyectos es mucho menor a lo previsto.

Sin embargo se han tenido logros interesantes: incremento substancial en la recaudación, basado en el mejoramiento de la eficiencia en la cobranza (82% en la actualidad); incremento en el nivel de servicio medido, que hoy representa 92% del caudal suministrado; censo de usuarios y catastro de redes; disminución de fugas con la consiguiente reducción de pérdidas de agua. Se han realizado satisfactoriamente los trabajos relacionados con la integración de información básica del servicio de agua a través de un censo de usuarios y de un catastro de redes con digitalización de la información hidráulica en planos de la ciudad.

Contrato de prestación de servicios de la ciudad de Puebla

El proyecto de la Ciudad de Puebla representa una forma interesante de iniciar un proceso de incorporación de una empresa privada en la prestación de los servicios. En este caso las autoridades locales en el mes de febrero de 1998, por conducto del organismo Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado de la Ciudad de Puebla (SOAPAP), decidió contratar los servicios de una empresa privada para la realización de actividades relacionadas con los aspectos comerciales del sistema a efecto de incrementar la eficiencia correspondiente de 65% a 95% en un periodo de dos años. Con ello se buscó mejorar la

situación financiera del sistema, de tal manera que en el mediano plazo el sistema pudiera ser capaz de realizar inversiones en infraestructura en mejores condiciones económicas y financieras.

Actualmente la empresa ganadora de la licitación da servicio a la ciudad de Puebla y a sus conurbaciones con una población total de 1.2 millones de habitantes, con 250 mil tomas de agua potable y con una superficie aproximada de 13 mil hectáreas.

SOAPAP se constituye en la autoridad reguladora del contrato aplicando una pena en puntos porcentuales sobre la facturación total, en caso de incumplimiento de las metas.

Este proyecto se ha visto afectado por problemas de índole social, político y jurídico, lo que ha impedido que la empresa cumpla con las metas comprometidas. Adicionalmente, la empresa reporta que sus márgenes operativos son bajos y se ha reducido el monto del contrato. Sin embargo, se puede concluir que es una experiencia interesante dado que es el primer proyecto en México que inicia con la participación de una empresa privada en el área comercial, como primer eslabón de un proceso que de consolidarse podrá fortalecer la posición financiera del sistema y estar en mejores condiciones para afrontar las inversiones en infraestructura que el sistema requiera.

No obstante, de la revisión realizada a los términos y condiciones del contrato, se observan aún aspectos negativos que podrían afectar el futuro desarrollo del proyecto. Por ejemplo, la regulación del contrato continúa a cargo del concedente; por aspectos políticos la suspensión del servicio a usuarios morosos no es llevada a cabo, entre otros aspectos.

Contratos de prestación de servicios para la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales

En lo que se refiere a la participación de empresas privadas en el diseño, puesta en marcha, operación y mantenimiento de plantas de tratamiento, en la década de los noventa el sector público inició un programa para la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales con el apoyo de empresas privadas. Entre los proyectos más relevantes se encuentran: las plantas de tratamiento de Puerto Vallarta, Toluca, Ciudad Juárez y Chihuahua.

En total, en los casi 11 años transcurridos a partir de 1993 se han construido y están en operación 24 plantas de tratamiento de aguas residuales con participación de empresas privadas. En la mayor parte de los casos la empresa ha sido contratada en un esquema tipo construir-operar-transferir, de acuerdo con el cual la empresa se responsabiliza por el financiamiento, construcción y operación de la planta durante un periodo suficiente para la recuperación de sus inversiones y el rendimiento del capital correspondiente, a través de una tarifa que cobra

al contratante por cada unidad de agua tratada entregada dentro de la calidad predeterminada. Al terminar el periodo contractual, la propiedad de la infraestructura es transferida formalmente a la entidad contratante.

A pesar de algunos tropiezos, ocasionados en su mayor parte por la incapacidad de los municipios para enfrentar el pago de las tarifas acordadas o por la negativa de las administraciones municipales entrantes de asumir los compromisos contractuales de sus antecesores, puede considerarse que el programa en su conjunto ha tenido resultados satisfactorios.

Estos proyectos representan una inversión total de más de 3 000 millones de pesos (de los cuales entre 30 y 40% tuvieron su origen en aportaciones subordinadas de Banobras), y una capacidad de tratamiento de casi 21 m³/s, dando atención a una población de cerca de 7 millones de personas. La capacidad instalada de estos proyectos, representa 28% del total de la capacidad de diseño existente a nivel nacional a fines de 2000 y constituye prácticamente la totalidad del incremento en capacidad logrado durante el último decenio.

Al sumar la inversión total en plantas de tratamiento realizadas con esquemas de participación privada a la realizada por las empresas concesionarias o contratistas de servicios de manejo total o parcial de sistemas de agua y saneamiento, tales como Aguascalientes y Cancún, puede estimarse la inversión realizada por el sector privado en la última década en el orden de 4 000 millones de pesos a precios corrientes, es decir, un promedio de 400 millones de pesos anuales, monto significativo pero que constituye un porcentaje menor cuando se compara con los requerimientos totales de inversión en el subsector.

Las causas principales que, desde el punto de vista del sector privado, han evitado el éxito total de los esquemas de participación privada en México y limitado una mayor intensidad de esa participación han incluido:

- La crisis económica del país.
- Incapacidad de pago de los organismos operadores.
- Insuficiencia de las garantías de recuperación.
- Marcos jurídicos poco claros y rígidos para la solución de problemas o situaciones comunes en esquemas de participación privada.
- Ausencia de un marco regulatorio apropiado.
- Falta de experiencia de las partes: sector público, sector privado e instituciones financieras.
- Una cultura derivada de una larga tradición de servicios públicos prestados a la población a bajo costo por el sector público.

Si bien no se trata, en el sentido estricto, de un caso de participación privada, también es interesante el proyecto de construcción de una planta de tratamiento y la rehabilitación de la red hidráulica en el municipio de Tlalnepantla de Baz,

la cual se financiará con recursos obtenidos a través de la colocación de certificados bursátiles, sin garantía del Gobierno Federal, lo cual constituye un concepto que probablemente podrá repetirse en otros casos.

ALGUNAS CONCLUSIONES

La participación privada en los sistemas de agua y saneamiento, se ha convertido, en las últimas dos décadas en una de las opciones más comentadas para resolver el evidente retraso de los servicios de agua y saneamiento en el mundo, situación particularmente preocupante en los países en vías de desarrollo.

Ante la escasez, ya crónica, de recursos técnicos, administrativos y financieros que aquejan a un buen número de organismos operadores en nuestro país, se ha visto a la iniciativa privada, en forma análoga a lo que ocurre en el contexto internacional, como un instrumento útil para lograr el mejoramiento de los servicios.

Es claro que dicha participación implica diversos tipos de riesgos. Desde luego, las que pueden derivarse del carácter monopólico del sector al combinarse con el objetivo de la empresa privada, por otra parte válido, de maximización de utilidades. Además, existen otros tipos de riesgos de tipo operativo, algunos de los cuales también afectan a los organismos públicos que prestan los servicios, así como obstáculos de diverso género a la entrada del sector privado en el subsector.

Una buena parte de esos riesgos puede paliarse o eliminarse con la creación de un marco regulatorio moderno, adecuado a las características jurídicas e institucionales de nuestro país. Será necesario para ello crear consenso y, en su caso, adecuaciones al marco jurídico, respecto a las atribuciones que las instancias de gobierno deben tener en el subsector de agua y saneamiento y, desde luego, generar los mecanismos necesarios.

En buena parte, el éxito o fracaso de la participación privada dependerá también de la capacidad de los diversos actores para asignar los diversos riesgos en una forma que se maximicen las posibilidades de éxito, así como para resolver los obstáculos existentes, con frecuencia exógenos a la empresa privada.

En efecto, para que las empresas privadas tengan un papel de mayor relevancia es necesario que los riesgos asociados a los proyectos se identifiquen en cada caso particular, analizando todas las variables pertinentes, incluyendo, desde luego, las sociales y políticas. Las partes involucradas: autoridades, empresa, usuarios y entes financieros deben minimizar los riesgos en la medida que cada parte y el conjunto los acepte y resuelva para que el proyecto se lleve a cabo en tiempo, costo y eficiencia. Si se responsabiliza a cualquiera de las partes por riesgos que no le corresponden la probabilidad de falla del proyecto es alta.

Un marco jurídico y regulatorio adecuado y esquemas de contratación o concesión que distribuyan los riesgos en forma óptima hará que pueda realizarse el potencial de las empresas privadas en el subsector de agua y saneamiento, de modo que se constituya en un instrumento más importante que hasta la fecha en la consecución de los objetivos nacionales en la materia, resolviendo una de las objeciones fundamentales que existen: la de la posible falta de equidad en la prestación de los servicios.

Finalmente, más allá de consideraciones ideológicas, puede concluirse que en nuestro país, como en otros, si bien la participación privada en los servicios de agua y saneamiento constituye una herramienta que puede ser útil en determinadas circunstancias, herramienta que hay que aprovechar en lo posible, no es una panacea y no puede sustituir en muchos casos total, o aún parcialmente a los servicios prestados directamente por el sector público.

REFERENCIAS

- Aguas de Barcelona Grupo Agbar, 1997, "Experiencia en América Latina", junio.
- Astor, Gerhard J., 1988, "Divulgación y aceptación en proyectos de abastecimiento de agua y saneamiento".
- Basañes, F., E. Uribe, and R. Willig, 1999, *Can Privatisation Deliver? Infrastructure for Latin America*, Washington D. C., Interamerican Development Bank (IDB).
- Baudoui, Rémi, 1992, "La fin de l'Etat aménageur", *Rouvoirs Locaux*, 13.
- Briscoe, John, 1996, "Water as an Economic Good: The idea and what it means in practice".
- Cadiou, Alain, "Las agencias francesas del agua: 25 años de desarrollo sostenible".
- Comisión Nacional del Agua, *La Participación Privada en la Prestación de los Servicios de Agua y Saneamiento. Conceptos Básicos y Experiencias*, coord. de la edición, Barocio, R., Rubén y José Trujillo J.
- Comisión Nacional del Agua, 1995, *Análisis Comparativo de Mecanismos de Administración y Cobro del Agua en Varios Países*, mayo.
- Comisión Nacional del Agua, 1996, *Definición del Marco Legal y Regulatorio para la Participación Privada en los Servicios de Agua Potable*, agosto.
- Comisión Nacional del Agua, 1999, *Decreto por el que se reforma y adiciona el Artículo 115 de la CPEUM (y comentarios)*, julio.
- Comisión Nacional del Agua, 2000, *Comisión Nacional del Agua, Situación Actual y Perspectivas*, Anexo I: *Información complementaria*, octubre.
- Comisión Nacional del Agua, 2000, *Comisión Nacional del Agua, Situación Actual y Perspectivas*, Anexo II: *Proyectos y acciones que requieren atención especial*, octubre.
- Comisión Nacional del Agua-BANOBRAS, 1996, *Nuevo Marco para la Participación Privada en los Servicios de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento en Ciudades de más de 500,000 Habitantes*, julio.

- Environmental Protection Agency, 1990, *Public-Private Partnership Case Studies: Profiles of Success in Providing Environmental Services*, septiembre.
- Haarmeyer, D., 1994, "Privatizing infrastructure: options for municipal systems", *Journal AWWA*, 86 (3), pp. 42-55.
- Hardoy, A. y R. Schusterman, 1999, "Las privatizaciones de los servicios de agua potable y saneamiento y los pobres urbanos", *Medio Ambiente y Urbanización*, 15 (54), pp. 63-76.
- Morales Reyes, Javier I., 1999, "Situación y propuestas para el Tratamiento de Aguas Residuales y Participación Privada en México".
- Swyngedouw, E., 1997, "Power, nature and the city. The conquest of water and the political ecology of urbanization in Guayaquil, Ecuador: 1880-1980", *Environment and Planning*, 29 (2), pp. 311-332.
- Taylor, G., 1999, *State Regulation & the Politics of Public Service. The Case of the Water Industry*, Londres y Nueva York, Mansell.

EL MARCO JURÍDICO DEL AGUA EN MÉXICO

Gustavo Carvajal Isunza y Daniel Basurto González

El fundamento de la regulación jurídica del agua en México lo encontramos en el quinto y sexto párrafos del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en los que se establece el listado de las aguas que se consideran propiedad de la nación; la facultad del ejecutivo federal para reglamentar la extracción y utilización de las aguas nacionales, así como para establecer zonas de veda, y la sujeción del uso o aprovechamiento de las aguas nacionales a la obtención de una concesión por parte del ejecutivo federal.

Asimismo, el artículo 115 constitucional, en su fracción tercera, otorga a los municipios la facultad, privativa en principio, para la prestación del servicio público de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales. En el ejercicio de dicha función los municipios están obligados a observar lo dispuesto por las leyes federales y estatales.

En el ámbito internacional, existen diversos tratados celebrados por México en materia de aguas, destacando por su importancia el Tratado sobre Distribución de Aguas Internacionales entre México y Estados Unidos de 1944, así como varios tratados relativos a la prevención y control de la contaminación del mar, como el Convenio sobre la Prevención de la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y otras Materias de 1972.

Las aguas nacionales encuentran su más amplia regulación en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su reglamento, los que tienen por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo sustentable. En estos ordenamientos se establecen las facultades y deberes de la Comisión Nacional del Agua (CNA), el órgano desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales a cargo de la gestión de las aguas nacionales.

Es importante destacar, que al momento de escribir este ensayo, el Congreso de la Unión ha aprobado un decreto que reforma y adiciona diversas disposiciones de la LAN que en su conjunto equivale prácticamente a la expedición

de un nuevo ordenamiento en la materia. Dicho decreto se encuentra en el Poder Ejecutivo no existiendo certeza sobre si será devuelto con observaciones al Poder Legislativo o si será publicado en sus términos en el *Diario Oficial de la Federación*.

Por su parte, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), en su carácter de legislación marco en materia ambiental, también hace referencia al agua y establece criterios para la prevención y control de su contaminación; faculta a la federación a expedir normas oficiales mexicanas en esa materia; otorga a las autoridades locales el control y vigilancia de descargas de aguas a sistemas de drenaje y alcantarillado; establece el deber de tratar las aguas residuales previo a su descarga o infiltración así como el deber de que éstas cumplan con lo dispuesto por las normas oficiales mexicanas y las condiciones particulares de descarga. La LAN es de aplicación supletoria a la LGEEPA.

La Ley Federal de Derechos contiene disposiciones en materia de aguas nacionales, relativas al monto de los derechos que se causan por el uso, aprovechamiento o extracción de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, así como por la utilización de éstas como cuerpos receptores de aguas residuales.

Por último, el marco jurídico se complementa con las normas oficiales mexicanas, las cuales establecen disposiciones de carácter técnico y encuentran su fundamento en la LGEEPA y en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización. Al respecto, destacan tres normas oficiales mexicanas vigentes relativas a las características que deben reunir las aguas residuales, ya sea que estas se viertan a cuerpos receptores nacionales, a los sistemas de alcantarillado municipales o que se vayan a reutilizar para servicios al público.

CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en su artículo 27, establece las bases fundamentales del régimen legal a que deberán sujetarse las aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional.

En primer término, establece que la propiedad originaria de las aguas comprendidas dentro del territorio nacional corresponde a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir su dominio a los particulares, constituyendo de ese modo la propiedad privada.

Asimismo, la Nación tiene en todo tiempo el derecho de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los recursos naturales susceptibles de apropiación, así como el de dictar las medidas necesarias para preservar y restaurar el equilibrio ecológico.

De esta forma, el Constituyente dotó al régimen de la propiedad en México con un contenido social, pasando la propiedad privada de ser un derecho absoluto, a convertirse en un derecho sujeto a las modalidades del interés público y a la regulación que dicte el Estado con miras al beneficio social.

El quinto párrafo del precepto constitucional en comento resulta de gran importancia, ya que en él se establecen de manera enumerativa las aguas que son propiedad de la Nación y, por exclusión, aquellas que son de propiedad privada.

Algunos ejemplos de aguas nacionales son los mares territoriales; las aguas marinas interiores; lagos, lagunas y esteros comprendidos en el territorio de dos o más entidades federativas, y; los ríos que tengan desembocadura en el mar, lagos, lagunas y esteros de propiedad nacional.

Por lo que se refiere a las aguas del subsuelo, la redacción del quinto párrafo se ha prestado a interpretaciones en el sentido de poner en duda si estas son o no de propiedad nacional.

A este respecto, en el año de 1986 la Suprema Corte de Justicia de la Nación, interpretando la exposición de motivos de la reforma de 1944 a este párrafo constitucional, se pronunció declarando que las aguas del subsuelo son de propiedad nacional.

En estrecha relación con esta cuestión, a finales del 2001 se presentó en la Cámara de Senadores una iniciativa de reforma a este párrafo constitucional, con objeto de aclarar su texto y hacer explícita la mención de las aguas del subsuelo como propiedad de la nación.

Respecto a las aguas de propiedad privada, se establece que las mismas se consideran como parte integrante de los terrenos por donde corran o en los que se encuentren sus depósitos; sin embargo, en el supuesto en que las aguas de propiedad privada se localicen en dos o más predios, su aprovechamiento se considerará de utilidad pública y quedará sujeto a las disposiciones que al efecto dicten las entidades federativas.

La Nación ejerce un dominio directo, inalienable e imprescriptible sobre las aguas nacionales, quedando sujetas a la regulación pública que al respecto se expida.

El Ejecutivo Federal está facultado para reglamentar la extracción y utilización de aguas nacionales, pudiendo establecer también zonas de veda, tanto para aguas del subsuelo como superficiales. Como consecuencia, la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales por los particulares requiere de la obtención previa de una concesión por parte del Ejecutivo Federal, otorgada de conformidad con lo que establezcan las leyes.

En consonancia con lo anterior, en el artículo 73 fracción XVII de la Carta Magna, se otorga al Congreso de la Unión la facultad para expedir leyes sobre el uso y aprovechamiento de las aguas de jurisdicción federal, misma que de manera conjunta con el artículo 27 constitucional, otorgan el sustento jurídico a la regulación secundaria sustantiva vigente en materia de aguas nacionales.

Al igual que tratándose de tierras, el artículo 27 constitucional prohíbe a los extranjeros adquirir el dominio directo sobre las aguas comprendidas dentro de la denominada franja prohibida.

Por su parte, la capacidad para adquirir el dominio directo sobre aguas de la Nación o para obtener concesiones sobre éstas, se limita en principio a los mexicanos por nacimiento o naturalización y a las sociedades constituidas conforme a las leyes mexicanas.

Por otra parte, la Constitución, en su artículo 73 fracción XXIX-G, faculta al Congreso de la Unión para expedir leyes que establezcan la concurrencia de los tres órdenes de gobierno en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico.

En uso de esa facultad se expidió la LGEEPA, la cual contiene disposiciones relativas al agua.

Por último, el artículo 115 constitucional otorga a los municipios la facultad, exclusiva en principio, para prestar el servicio público de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales, estando obligados a observar lo dispuesto por las leyes federales y estatales en la prestación de ese servicio.

TRATADO SOBRE DISTRIBUCIÓN DE AGUAS INTERNACIONALES ENTRE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS Y LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Este Tratado fue suscrito el 3 de febrero de 1944 en la ciudad de Washington, D.C., publicándose en el *Diario Oficial de la Federación* el 30 de marzo de 1946.

El Tratado tiene por objeto establecer las bases y reglas para la distribución entre los Estados Unidos de América y México, de las aguas internacionales de los ríos Colorado, Tijuana y Bravo; respecto de este último, el Tratado únicamente abarca el tramo comprendido desde Fort Quitman, Texas, al Golfo de México.

Para el uso común de las aguas internacionales objeto de este Tratado, las partes acordaron el siguiente orden de preferencia: usos domésticos y municipales; agricultura y ganadería; energía eléctrica; usos industriales; navegación, y pesca y caza.

Por lo que se refiere a la asignación de las aguas del río Bravo, el Tratado estipula que a México le corresponde la totalidad de aguas provenientes de los ríos San Juan y Álamo, así como las dos terceras partes de las aguas provenientes de los siguientes afluentes mexicanos: ríos Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido y Salado y Arroyo de las Vacas.

A Estados Unidos le corresponde la totalidad de las aguas provenientes de los ríos Pecos y Devils, del manantial Goodenough y de los arroyos Alamito, Terlingua, San Felipe y Pinto, así como la tercera parte de las aguas provenientes de los afluentes mexicanos arriba mencionados.

Respecto a esta tercera parte de agua proveniente de los citados afluentes mexicanos, el Tratado previene que no deberá ser menor en conjunto a 431 721 000 metros cúbicos anuales, en ciclos de cinco años. En caso de que México dejara de cubrir esa cuota en un ciclo, estará obligado a cubrir los faltantes en el ciclo siguiente con agua procedente de los mismos tributarios.

México ha incumplido con esta entrega de aguas durante los quinquenios de 1992 a 1997 y de 1997 a 2002, lo cual ha sido motivo de recientes disputas con Estados Unidos, mismas que culminaron en la celebración de un acuerdo respecto al manejo de las aguas internacionales en la vertiente del río Bravo.

Este acuerdo se sustenta en la conciliación de las necesidades de abasto de las comunidades fronterizas y los productores agrícolas, así como en el cumplimiento de los compromisos establecidos entre ambos países.

Por último, corresponden a México y a Estados Unidos, por partes iguales, los escurrimientos del cauce principal del río Bravo debajo de la presa inferior principal internacional de almacenamiento; cualquier otro escurrimiento no asignado en el cauce principal del río Bravo y; las aportaciones de todos los afluentes no aforados, entendiéndose por éstos aquellos afluentes no mencionados.

Por lo que respecta a las aguas del río Colorado, el Tratado estipula que Estados Unidos debe entregar anualmente a México un volumen garantizado de 1 850 234 000 metros cúbicos.

En caso de que, en cualquier año, el río Colorado cuente con agua en exceso de la necesaria para la entrega del volumen anual garantizado a México y para satisfacer las necesidades de consumo de Estados Unidos, éste deberá entregar cantidades adicionales de agua proveniente del sistema del río Colorado, las cuales no excederán de 246 697 000 metros cúbicos anuales.

En relación con el río Tijuana, el Tratado sólo sienta las bases a que deberán sujetarse los gobiernos de las partes signantes en la celebración de futuros acuerdos para la distribución de sus aguas.

Por otra parte, el Tratado modifica la denominación de la Comisión Internacional de Límites, creada al amparo de una Convención suscrita por las partes el primero de marzo de 1889, para cambiarlo por el de Comisión Internacional de Límites y Aguas. Esta Comisión tiene el carácter de organismo internacional y se conforma por una Sección Mexicana y por una Sección de Estados Unidos, cada una encabezada por un Comisionado, a quienes se les reconoce carácter diplomático.

En adición a las atribuciones otorgadas por la Convención de 1889, a la Comisión se le confía la aplicación del Tratado, la reglamentación y el ejercicio de los derechos y el cumplimiento de las obligaciones adquiridas por las partes signantes, así como la resolución de los conflictos originados con motivo de la observancia y ejecución del Tratado, aunque de manera limitada.

La Comisión ejerce su jurisdicción en los tramos limítrofes de los ríos Bravo y Colorado, sobre la línea divisoria terrestre entre México y Estados Unidos, así como sobre las obras construidas en esos tramos y en esa línea divisoria.

Por su parte, cada una de las Secciones de la Comisión ejerce jurisdicción sobre las obras construidas dentro de su territorio, aún tratándose de obras que se realicen en cumplimiento del Tratado, las cuales tienen el carácter de internacionales.

Los gastos de sostenimiento de cada Sección corren a cargo del país del que dependa, mientras que los gastos comunes acordados por la Comisión se cubren por partes iguales.

LEY DE AGUAS NACIONALES

La LAN, entró en vigor el 2 de diciembre de 1992. Esta ley reglamenta los párrafos quinto y sexto del artículo 27 constitucional y su objeto es regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas consideradas nacionales, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr un desarrollo integral sustentable. Como ya fue señalado, la LAN y su reglamento, son de aplicación supletoria a la LGEEPA y constituyen la más amplia regulación de las aguas nacionales.

La LAN dispone —en concordancia con lo establecido por el artículo 27 constitucional—, que la autoridad responsable de la administración de las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, corresponde al Ejecutivo Federal, quien ejercerá sus facultades directamente o a través de la CNA. Esta disposición hay que entenderla en el contexto de que es la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) la secretaría del Poder Ejecutivo a la que son asignadas las principales atribuciones en materia de aguas, pero que serán ejercidas en su mayor parte a través de la Comisión Nacional del Agua. Dicho órgano administrativo desconcentrado fue creado por Decreto el 16 de enero de 1989 dependiendo en un inicio de la entonces Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, cuyas funciones eran entre otras, administrar y regular, en los términos de la ley, las aguas nacionales, la infraestructura hidráulica, y los recursos que se le destinen. La CNA quedó a cargo de un director general designado por el Ejecutivo Federal y de conformidad con un Decreto posterior, del 19 de abril de 1991, la Comisión cuenta con un Consejo Técnico integrado por los titulares de diversas secretarías.

De acuerdo al alcance de nuestra exposición, a continuación presentaremos una descripción general del contenido la ley, haciendo hincapié, cuando corresponda, en aspectos que resulten de trascendencia.

La LAN esta integrada por 124 artículos organizados en diez títulos que tratan sucesivamente de las siguientes materias: disposiciones preliminares; administración del agua; programación hidráulica; derechos de uso y aprovechamiento de aguas nacionales; zonas reglamentadas de veda o de reserva; usos del agua; prevención y control de la contaminación del agua; inversión en infraestructura hidráulica; bienes nacionales a cargo de la Comisión, e infracciones, sanciones y recursos.

La explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales se realiza a través de la llamada concesión o asignación. La concesión es el acto jurídico, en virtud del cual se otorga a una persona física o moral el derecho para explotar, usar o aprovechar las aguas de propiedad nacional; por su parte, la asignación es el acto jurídico por el cual se otorga el derecho de explotación uso o aprovechamiento de las aguas de propiedad nacional, a las dependencias y organismos descentralizados de la administración pública federal, estatal o municipal.

Los concesionarios o asignatarios tienen, entre otras facultades, la de transmitir los derechos de sus títulos mediante un simple aviso a las autoridades correspondientes, sin embargo, cuando se puedan afectar los derechos de un tercero, o bien, cuando se alteren o modifiquen las condiciones hidrológicas o ecológicas de las cuencas o acuíferos, se requerirá autorización previa de la CNA.

La LAN, en su Título Sexto, establece y regula los usos del agua. Los usos señalados en dicho Título consisten en los siguientes: uso público urbano, el uso agrícola, el uso en generación de energía eléctrica y el uso en otras actividades productivas en las que se mencionan la acuicultura y el turismo; dentro de éste mismo título, se regula también el control de avenidas y la protección contra inundaciones.

Cuando se trata de aguas nacionales para uso público urbano, estas son asignadas por la CNA al respectivo sistema estatal o municipal de agua potable y alcantarillado. La explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales que se les hubiera asignado, incluyendo las residuales, desde el punto de su extracción o entrega por la CNA y hasta el sitio de su descarga a cuerpo receptor que sea bien nacional, es competencia de las autoridades municipales con el concurso de los gobiernos de los estados en los términos de la ley, quedando reservada dicha explotación, uso o aprovechamiento, a las autoridades municipales a través de sus entidades paraestatales o concesionarias.

Por lo que respecta al uso del agua en otras actividades productivas, la ley se limita a señalar que dicho uso se podrá realizar por personas morales o físicas, previa la concesión respectiva otorgada por la CNA en los términos de la ley y su reglamento.

El título de la LAN, relativo a la Prevención y Control de la Contaminación del Agua, se enfoca a desarrollar un verdadero catálogo de atribuciones de la CNA y establecer normas para prevenir y controlar la contaminación del agua. Estas

disposiciones derogan tácitamente algunas normas de la LGEEPA, incluidas las que le conferirían un papel protagónico, lo cual queda manifiesto en las modificaciones que se introdujeron en 1992 a la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, haciendo hincapié en la exposición de motivos de la LAN, que el propósito es consolidar una sola autoridad en materia de calidad del agua; objetivo que en parte se ha alcanzado, ya que las facultades, que en dicha materia le competen a la Semarnat, consisten en fijar las Normas Ecológicas y a la CNA fijar las condiciones particulares de descarga de aguas residuales en cuerpos receptores que sean bienes nacionales, y vigilar por lo que toca al agua, el debido cumplimiento de las leyes en materia ambiental.

Los demás preceptos del título que se comenta, están destinados a las reglas de las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores que sean aguas nacionales o demás bienes nacionales, incluyendo aguas marinas, así como los casos de infiltración en terrenos que sean bienes nacionales o en otros terrenos, cuando puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos.

La idea general es que esas descargas requieren de permiso de la CNA, pero se puede sustituir el permiso por un simple aviso, mediante acuerdos de carácter general por cuenca, acuífero, zona, localidad o usos. En todo caso, corresponde a los municipios el control de la descarga de aguas residuales a los sistemas de drenaje o alcantarillado.

La CNA puede realizar inspección o fiscalización de las descargas de aguas residuales en el ámbito federal para verificar el cumplimiento de la LAN, haciendo constar sus resultados en actas circunstanciadas para que en su caso se dé la aplicación de sanciones legales. La violación de la prohibición de descargar aguas residuales fuera del marco de la LGEEPA, puede conducir a la comisión de un delito, mismo que se encuentra tipificado en el Código Penal Federal de acuerdo a las últimas reformas publicadas.

La LAN no define a detalle el procedimiento a observarse para el desarrollo de las visitas de inspección, por lo que en esta materia resulta aplicable, de manera supletoria, la Ley Federal del Procedimiento Administrativo. Ahora bien, la facultad de realizar inspecciones, permite a la CNA establecer y vigilar el cumplimiento de las condiciones particulares de descarga que deben satisfacer las aguas residuales que se generen en bienes y zonas de jurisdicción federal; de aguas residuales vertidas directamente en aguas y bienes nacionales, o en cualquier terreno cuando dichas descargas puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos.

Finalmente, cabe destacar que la LAN cuenta con un reglamento que regula en específico los temas abordados por esa ley. Únicamente es agregado un Título Undécimo referente a la conciliación y arbitraje. Este título regula en específico la solución de controversias a través de la conciliación y el arbitraje, estableciendo las reglas a las que dichos métodos de solución deberán sujetarse, y en los cuales, la CNA, si las partes así lo deciden, podrá participar como árbitro.

Al momento de publicar el reglamento de la LAN en 1994, las condiciones sobre las que dicha ley se había concebido, habían cambiado por lo que el Ejecutivo Federal consideró adecuado el desarrollar una serie de obligaciones no contempladas en la misma ley, rebasando con ello, en un sin número de ocasiones, lo establecido en ella misma con lo que permite que la misma CNA actúe de manera discrecional en muchos casos. Por ello y por la deficiente administración del agua así como la escasa concientización de lo que éste valioso recurso significa, se consideró oportuno el que se entrara a su revisión, la cual generó trabajo tanto del Ejecutivo Federal como del Legislativo mismo, concluyendo en un producto que todavía, a la fecha de redacción del presente ensayo, se desconoce su contenido final.

LA PROBLEMÁTICA ACTUAL DE LA ADMINISTRACIÓN DEL AGUA Y EL PROYECTO DE REFORMAS A LA LEY DE AGUAS NACIONALES

Es de sobra sabido, que la problemática relacionada con el agua se ha venido agravando en los últimos años, y que la LAN, tal como se encuentra actualmente, no resulta suficiente para dar solución a esos problemas.

Desde hace varios años, la legislación en materia de aguas nacionales ha dejado de corresponder a la realidad del país. A pesar de que se han llevado a cabo tanto por la autoridad, como por diversas instituciones educativas y de investigación, estudios que denuncian esta circunstancia, no ha habido hasta la fecha, un esfuerzo oficial que evalúe integralmente el impacto que el estado actual de la legislación en esta materia tiene sobre la explotación de nuestros recursos hídricos. Este esfuerzo correspondía, al menos desde el año 2000, a la Comisión Federal de Mejora Regulatoria a quien el artículo 69-E de la Ley Federal de Procedimiento Administrativo le encomienda, entre otras funciones, revisar el marco regulatorio nacional y diagnosticar su aplicación.

Al momento de redactar este ensayo el Congreso de la Unión ha aprobado un decreto que reforma y adiciona diversas disposiciones de la LAN —que en su conjunto equivale a la expedición de un nuevo ordenamiento en la materia— y con el cual se pretende dar solución a la problemática en la que se encuentra el recurso hídrico. Sin embargo, varios aspectos jurídicos y de instrumentación resultan cuestionables, y por ello no existe certeza respecto a si entrará en vigor, será vetado, o si será modificado.

Los principales problemas relacionados con el agua en la actualidad son los siguientes:

1. El enfoque actual en el manejo del agua no incluye su dimensión ambiental.
2. Existe una grave sobreexplotación del agua.
3. El abastecimiento del agua y la cobertura de alcantarillado son insuficientes.

4. La calidad del agua es deficiente.
5. Falta financiamiento para el abastecimiento y mejora en la calidad del agua.
6. El agua se administra en forma centralizada.
7. Falta cooperación dentro y entre cuencas.
8. La vigilancia del cumplimiento de la normatividad en materia de aguas, no responde a una vigilancia integral de los recursos naturales.

A continuación, expondremos las principales soluciones que a través de las reformas a la LAN se proponen para algunos de los problemas mencionados. Es importante tener en cuenta que, como hemos señalado, estas reformas han sido objeto de muchas observaciones que incluso señalan la inconstitucionalidad de varias de sus disposiciones, por lo que, a pesar de que se presentan soluciones que pudiesen ser adecuadas, pudiesen ser imposibles de implementar bajo nuestro actual sistema jurídico, y por tanto, las reformas en cuestión, en caso de que llegasen a entrar en vigor, serían de imposible aplicación.

1. El enfoque actual en el manejo del agua no incluye su dimensión ambiental. La LAN tiene pocas referencias a la LGEEPA y a una visión del agua como un elemento natural de gran trascendencia para el equilibrio ecológico y el desarrollo de la vida misma, más bien, promueve el aprovechamiento y saneamiento del agua, sin considerar criterios de sustentabilidad, conservación, reuso, servicios ambientales y el manejo integrado del agua y el bosque.

A este respecto, las reformas a la LAN introducen principios de política ambiental para el manejo sustentable del agua, así como un nuevo esquema de administración de este recurso que se basa en su gestión por cuencas hidrológicas y en el manejo integrado del agua y el bosque.

2. Existencia de una grave sobreexplotación del agua. Actualmente el agua se utiliza como un recurso abundante, infinito y siempre renovable. En este sentido, la actual LAN no reconoce el enfoque de escasez ni contiene disposiciones que promuevan el ahorro del agua. En las reformas comentadas, se establece que el agua se concesionará o asignará basándose en su disponibilidad, estableciéndose además, incentivos para su conservación. No obstante lo anterior, la prelación en el uso y el excesivo beneficio que de manera constante se ha otorgado a algunos sectores improductivos y en muchos casos carentes de conciencia de lo que el agua significa, propicia que se siga utilizando y contaminando éste recurso de manera indiscriminada. Es paradójico que quien contribuye con más de 80% de las aportaciones económicas en la materia, usa menos de 20% del recurso y quienes más lo afectan, es quien menos contribuye con los correspondientes derechos que se establecen en la Ley Federal de Derechos.

3. *Falta de financiamiento para el abastecimiento y mejoramiento de la calidad del agua.* Se requieren 735 mil millones de pesos para cubrir la actual demanda de agua potable, cantidad que se tendrá que incrementar de manera proporcional al número de habitantes de nuestro país. Es una lamentable verdad que el presupuesto del Gobierno Federal, de los Estados y de los municipios no es suficiente para enfrentar los crecientes retos en la demanda por abastecimiento de agua y para aumentar la cobertura en el tratamiento de la misma (de acuerdo a datos de la Semarnat, en el año del 2002, los municipios debían a la Federación 72 mil millones de pesos por pagos atrasados por el uso del agua). Un factor que incrementa la problemática generada por la falta de financiamiento, es el hecho de que lo que se cobra por los servicios de agua no es invertido en conservar el recurso hídrico y promover su uso eficiente.

Es en este punto quizá donde innovaciones de mayor trascendencia se pretenden implementar a través de las reformas a la LAN. En las mismas se establece un sistema de administración del agua por cuencas hidrológicas, donde siguiendo el principio conocido como “el agua paga por el agua”, se le otorgan facultades fiscales al “Organismo” que administre la correspondiente cuenca, para que los recursos recabados por sanciones, uso y aprovechamiento de las aguas, sean administrados y reinvertidos en la misma cuenca que generó el cobro, para beneficio de ella. Sobre este particular se cuestiona si un organismo como el que se plantea, pudiera tener facultades suficientes para recaudar y el fisco federal tan sólo se quedara viendo pasar los recursos que, como derechos, se estuvieran pagando por aquellos obligados a enterarlos. Consideramos que la Secretaría de Hacienda y Crédito Público sería la primera en no estar de acuerdo con este esquema.

4. *Administración del agua de manera centralizada.* La falta de participación de los gobiernos estatales, municipales y de los usuarios en la toma de decisiones y en la administración sustentable del agua, ha sido en parte provocada por el esquema de administración centralizada del agua. Este esquema genera manifiestas desigualdades que provocan que la asignación de recursos financieros para la administración del recurso se haga de manera discrecional desde la administración central del poder ejecutivo.

Con el objetivo de solucionar esta problemática, las reformas a la LAN pretenden descentralizar la CNA, de manera que esta obtenga un patrimonio propio y una autonomía más eficaz, y que de ella dependan “Organismos de cuenca” con facultades de fiscalización y toma de decisiones autónomas sobre las cuencas que administran. Además los estados y municipios participarían en “Consejos Técnicos de Cuenca”, pretendiéndose garantizar el acceso a la información y la toma de decisiones a nivel regional. Si bien lo anterior parecería de interés, novedoso y aparentemente de acuerdo con los conceptos de descentralizar los

actos de autoridad, también es cierto que se estarían presentado otro tipo de problemas como son el hecho de cuestionar si una CNA de naturaleza descentralizada pudiera tener las facultades suficientes para poder dar en concesión bienes del dominio público como son las aguas nacionales cuando la misma Constitución establece en su artículo 27, que éstas aguas sólo podrán ser concesionadas o asignadas por el Ejecutivo Federal, siendo en consecuencia necesario cuestionar si un organismo descentralizado forma parte o no de dicho poder.

5. *La vigilancia del cumplimiento de la normatividad en materia de aguas, no responde a una vigilancia integral de los recursos naturales.* Bajo el actual esquema respecto a la inspección y vigilancia del cumplimiento de la normatividad ambiental, y en específico de la del agua, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa) tiene facultades para inspeccionar y vigilar la normatividad respecto a todos los recursos naturales, con excepción del agua. Por su parte, la CNA tiene atribuciones en esta materia únicamente respecto al agua. Lo anterior plantea serias dificultades para vigilar el cumplimiento de la normatividad de una manera integral, máxime si el manejo integral del agua necesariamente implica su vigilancia en armonía con los demás recursos naturales asociados, así como de los servicios ambientales que aporta.

Enfocado a la solución de esta problemática, las reformas a la LAN otorgan en una de sus disposiciones, facultades concurrentes a la Profepa, con el fin de que pueda ser ella, o bien la CNA, las que realicen la inspección y vigilancia del cumplimiento de la normatividad en materia de aguas, sin embargo, esto dejaría al destinatario de la disposición en un estado de incertidumbre jurídica.

LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE

La LGEEPA encuentra su sustento constitucional en la fracción XXIX-G de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

Tiene por objeto establecer la concurrencia de los tres órdenes de gobierno —Federación, entidades federativas y municipios— en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico.

Las disposiciones de la LGEEPA prevalecen sobre las de la LAN, ya que éste último ordenamiento le resulta de aplicación supletoria.

El tema del agua es abordado desde dos perspectivas: su aprovechamiento sustentable y la prevención y control de su contaminación.

En primer término, establece una serie de criterios ambientales que deberán ser considerados en el aprovechamiento sustentable del agua, como la protección de los elementos naturales que inciden en el ciclo hidrológico y la responsabili-

dad de los usuarios en la preservación y aprovechamiento sustentable del agua, entre otros.

Estos criterios deben ser considerados a su vez por el Estado en la realización de diversos actos de autoridad estrechamente relacionados con el agua, como el otorgamiento, suspensión y revocación de autorizaciones para su aprovechamiento, la programación nacional hidráulica o el establecimiento de vedas, por mencionar algunos.

En materia de prevención y control de la contaminación del agua, también se establecen criterios ecológicos a observarse en diversos actos de autoridad.

A las autoridades competentes de las entidades federativas se les otorga el control de las descargas a sistemas de drenaje y alcantarillado, la vigilancia del cumplimiento con las normas oficiales mexicanas relacionadas y la facultad de requerir la instalación de sistemas de tratamiento o para dar tratamiento por sí mismas a las aguas residuales.

Todas las aguas residuales que contengan contaminantes deben ser tratadas antes de su descarga o infiltración, cumplir con las normas oficiales mexicanas y las condiciones particulares de descarga y se debe contar con autorización de la autoridad federal o local competente.

Tratándose de actividades económicas susceptibles de contaminar el agua, el otorgamiento de concesiones, asignaciones o permisos para su explotación, uso o aprovechamiento, se condiciona al tratamiento previo de las aguas residuales que se produzcan.

LEY FEDERAL DE DERECHOS

La Ley Federal de Derechos tiene por objeto establecer los derechos que se deberán pagar por el uso o aprovechamiento de los bienes del dominio público de la nación, así como por recibir los servicios que presta el Estado en sus funciones de derecho público.

A la materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, la Ley Federal de Derechos dedica cuatro de sus capítulos¹.

En primer término, se establecen los derechos que se deberán pagar por los servicios relacionados con el agua y sus bienes públicos inherentes, los cuales consisten básicamente en servicios de carácter administrativo prestados por la CNA, tales como la expedición de títulos de concesión o asignación, autorizaciones, permisos, certificados, así como trámites relacionados con el Registro Público de Derechos de Agua.

¹ Capítulo VII del Título I y Capítulos VIII, IX y XIV del Título II.

Asimismo, se faculta a la CNA a ejercer atribuciones de carácter fiscal en materia de aguas nacionales, entre las que destacan las de comprobación fiscal, determinación de contribuciones omitidas e imposición de multas.

Por lo que se refiere al uso, explotación o aprovechamiento de aguas nacionales, tanto superficiales como del subsuelo, se establecen cuotas diferenciadas de derechos atendiendo al volumen extraído y a la zona de disponibilidad del agua en que se efectúe su extracción, estableciéndose al efecto nueve zonas de disponibilidad. La zona de disponibilidad con la tarifa más alta es la que comprende al Distrito Federal y algunos municipios del Estado de México y San Luis Potosí.

A su vez, se establecen exenciones al pago de este derecho tratándose de distritos y unidades de riego, así como por el aprovechamiento de aguas residuales cuando con este motivo se deje de utilizar agua de otro tipo, entre otras.

También se establece la obligación de contar con aparatos de medición de las aguas que se usen o aprovechen, bajo el apercibimiento que en caso contrario la CNA podrá determinar presuntivamente el consumo de agua.

El uso, goce o aprovechamiento de bienes inmuebles nacionales a cargo de la CNA, causa el pago de derechos, los cuales se determinan aplicando una tarifa anual por metro cuadrado aprovechado.

A los distritos y unidades de riego y de drenaje se les exenta del pago de derechos por el uso, goce o explotación de la infraestructura que les haya sido permitida o concesionada, así como tampoco deberán pagar derechos las entidades federativas y municipios que presten el servicio público de agua potable y alcantarillado, por el uso o aprovechamiento de infraestructura hidráulica cuya construcción haya estado a cargo del Gobierno Federal.

Por último, el uso o aprovechamiento de bienes del dominio público como cuerpos receptores de aguas residuales obliga al pago de los derechos respectivos, los cuales se determinan atendiendo al tipo de cuerpo receptor en donde se realice la descarga, el volumen de agua descargada y la clase de contaminantes vertidos.

Al respecto, la Ley Federal de Derechos establece tres tipos de cuerpos receptores así como los límites máximos permisibles de contaminantes que pueden ser descargados para efectos del pago de este derecho.

Los contribuyentes de este derecho deben determinar trimestralmente las concentraciones de contaminantes presentes en sus descargas y sólo estarán obligados al pago de derechos en caso de que éstas sean superiores a dichos límites, por el excedente del contaminante correspondiente, de aquel que resulte la mayor cantidad a pagar.

Los ingresos obtenidos por este concepto se destinan a la CNA para obras de infraestructura de saneamiento por cuenca hidrológica.

Se exenta del pago de derechos, entre otras, a las personas que descarguen aguas residuales a redes de drenaje o alcantarillado que no sean bienes del dominio público de la Nación;² a quienes viertan aguas residuales a la fuente de donde se extrajo cuando esta no haya sufrido degradación en calidad y temperatura; las descargas provenientes de riego agrícola, y a aquellas personas que presenten y cumplan con un programa de acciones para mejorar la calidad de sus aguas residuales, siempre y cuando mantengan o mejoren la calidad de éstas.

La Ley Federal de Derechos establece un incentivo para mejorar la calidad de las descargas de aguas residuales, al otorgar un descuento en el pago del derecho por uso o aprovechamiento de aguas nacionales, a quienes cuenten con plantas de tratamiento, así como a aquellas personas que como consecuencia de mejoras en sus procesos productivos descarguen aguas residuales de calidad superior a la establecida en los límites máximos permisibles.

PROBLEMÁTICA DE LA LEY FEDERAL DE DERECHOS

La Ley Federal de Derechos, al determinar el monto de derechos que deberán pagarse por el uso, explotación o aprovechamiento de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, juega un importante papel, junto con la normatividad sustantiva en la materia, como instrumento de fomento del uso eficiente del agua.

Según la CNA, la valoración del agua como un bien económico tiene como funciones reflejar el costo de proveerla, asegurar recursos para recuperar y realizar inversiones, asignarla a los usos de mayor beneficio para la sociedad y racionalizar su uso.³

La Ley Federal de Derechos en materia de aguas nacionales se rige por el principio de que el agua ostenta un valor económico, según su disponibilidad y por el principio de que el contaminador paga.⁴

Sin embargo, estos principios se ven desvirtuados por la política pública de esquemas de exenciones al uso agrícola de las aguas nacionales establecido en la Ley Federal de Derechos, el cual propicia un uso ineficiente de las aguas nacio-

² Este es un error de la Ley Federal de Derechos ya que las personas que descarguen aguas residuales a redes de drenaje o alcantarillado que no sean bienes de dominio público de la Nación, no están obligadas al pago de este derecho.

³ Ponencia presentada por la Gerencia de Normatividad y Estudios Económicos de la Comisión Nacional del Agua en el seminario "Agua: Manejo y Aspectos Ambientales", celebrado el 25 de septiembre de 2001 en la Ciudad de México bajo el auspicio de la American Chamber of México.

⁴ Cházaro, Segio, *et al.*, "Uso sustentable del agua en México. Reto de nuestro tiempo", *México Desconocido*, México, 1999, p. 240.

nales, fomenta su desperdicio y evita su aprovechamiento en actividades más productivas, constituyendo lo anterior la principal problemática de este ordenamiento legal.

Asimismo, si se tiene en consideración que 78% de las aguas nacionales se destinan al uso agrícola⁵, las pérdidas de agua en este sector son del orden de 54% debido a evaporación o fugas⁶ y que el uso agrícola genera 62% de las aguas residuales nacionales, de las cuales la mayor parte no recibe tratamiento alguno,⁷ resulta evidente la urgencia de adoptar medidas al respecto.

En virtud de lo anterior es que se requiere de una reforma a la Ley Federal de Derechos en sus disposiciones relativas al uso agrícola de las aguas nacionales, estableciéndose al efecto un cobro de derechos que refleje el verdadero valor del agua y que tenga por efecto la concientización de los usuarios y la consecuente racionalización en el uso del recurso.

Mientras se siga otorgando a los usuarios agrícolas de forma gratuita el uso, aprovechamiento y explotación de las aguas nacionales que tienen concesionadas, se ve lejana una solución a la principal problemática que plantea la Ley Federal de Derechos.

A continuación se presenta una exposición de las disposiciones de la Ley Federal de Derechos que establecen incentivos negativos al uso racional y eficiente de las aguas nacionales, que en nuestra opinión deberían ser reformados:

A. Servicios relacionados con el agua y sus bienes públicos inherentes

A los usuarios de aguas nacionales que se dediquen a actividades agrícolas se les exenta del pago de los siguientes derechos:⁸

- i.* Prórroga de títulos de concesión para explotar, usar o aprovechar aguas nacionales.
- ii.* Expedición de títulos de concesión para el uso o aprovechamiento de zonas federales y bienes nacionales a cargo de la CNA.
- iii.* Prórroga del permiso de descarga de aguas residuales.
- iv.* Expedición del permiso para la construcción de obras hidráulicas y perforación de pozos o construcción de obras en zona federal.
- v.* Modificación a las características de los títulos de concesión o permisos.
- vi.* Inscripción de los títulos de concesión y permisos en el Registro Público de Derechos de Agua.

⁵ *Programa Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2001-2006*, publicado en el *Diario Oficial de la Federación* del 13 de febrero de 2002, Segunda Sección, p. 28.

⁶ *Ibidem*.

⁷ *Eficiencia y uso sustentable del agua en México: participación del sector privado*, Cespedes CCE y CMIC, México, 1998, p. 26.

⁸ Artículo 192-D en relación con los artículos 192 y 192-A.

B. Explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales

Las personas físicas dedicadas a actividades agrícolas no deben pagar derechos por la extracción o derivación de aguas nacionales, siempre y cuando sea con objeto de satisfacer sus necesidades domésticas.⁹

Asimismo, se exenta del pago de derechos por la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales, tanto superficiales como del subsuelo, a los usuarios agropecuarios de las mismas, así como a los distritos y unidades de riego, siempre y cuando no rebasen las dotaciones autorizadas o los volúmenes de agua concesionados.¹⁰

Al respecto, la propia CNA ha manifestado que “ante la necesidad de recursos para realizar inversiones en infraestructura hidroagrícola, tecnificación del riego y mejora en eficiencias, con el objetivo de liberar volúmenes de agua para otros usos, se ha planteado la eliminación de la exención al sector agrícola en el pago de derechos por uso de aguas nacionales”.¹¹

La eliminación de esta exención no sólo traería beneficios económicos, sino también de carácter social, al ser uno de sus objetivos la mejora de la infraestructura hidroagrícola y de las técnicas de riego.

Asimismo, la eliminación de esta exención es acorde con los objetivos del Programa Nacional Hidráulico 2001-2006, entre los que destacan el fomento del uso eficiente del agua en la producción agrícola, así como determinar el costo del agua de acuerdo a su valor de escasez e implementar su justo cobro.¹²

Cabe mencionar que con la reforma de diciembre de 2002 a la Ley Federal de Derechos¹³, se ha tomado el primer paso hacia la eliminación de esta exención, al obligar a los usuarios agrícolas de aguas nacionales al pago de derechos por cada metro cúbico de agua que exceda del volumen concesionado.

Sin embargo, esta reforma podría tener un desafortunado destino ya que el monto de derechos que deberán pagar los usuarios agrícolas resulta ínfimo, aunado al hecho de no existe actualmente una aplicación estricta de la LAN y de la propia Ley Federal de Derechos, lo que imposibilita determinar si se respetan los volúmenes de agua concesionados.

La Ley Federal de Derechos establece la obligación de contar con aparatos de medición y de llevar un registro de las lecturas del medidor a los contribuyentes del derecho por la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales.¹⁴

⁹ Artículo 224 fracción I en relación con el artículo 222.

¹⁰ Artículo 224 fracción IV en relación con el artículo 222.

¹¹ Nota *supra* 3.

¹² *Programa Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2001-2006, op. cit.*, p. 53.

¹³ *Diario Oficial de la Federación* del 30 de diciembre de 2002.

¹⁴ Artículo 225.

No obstante lo anterior, en los distritos de riego la medición es prácticamente inexistente y aunque en ocasiones se utilizan métodos de medición indirectos, la CNA carece de un control efectivo respecto de los volúmenes de agua utilizados.

La medición de los volúmenes de aguas nacionales utilizados es un asunto de vital importancia para efectos de planeación y fiscalización por parte de la CNA. Sin una medición de los volúmenes extraídos, la CNA difícilmente podrá planear con certidumbre la disponibilidad de aguas nacionales para el otorgamiento de futuras asignaciones o concesiones, o bien, para revocar las vigentes. Del mismo modo, las tareas de fiscalización e inspección se ven imposibilitadas al carecerse de los elementos que permitan determinar si los usuarios están utilizando mayores volúmenes que los autorizados, lo que llevaría a la aplicación de sanciones administrativas y fiscales.

C. Uso o goce de inmuebles nacionales a cargo de la CNA

Los distritos de riego y unidades de riego y de drenaje que cuenten con concesión o permiso para la administración, operación, conservación y mantenimiento de éstos, no están obligados al pago de derechos por el uso, goce o explotación de la infraestructura respectiva.¹⁵

El caso de los apoyos otorgados a los distritos y unidades riego resulta muy particular, ya que “históricamente las grandes obras de infraestructura hidroagrícola han sido cubiertas por el gobierno federal con recursos provenientes de la recaudación general, no por los beneficiarios de la infraestructura”.¹⁶

Si a lo anterior sumamos la exención en el pago de derechos por el uso, goce o explotación de esa infraestructura, entonces tenemos que se carece de incentivos para que estos usuarios hagan un uso eficiente del agua o inviertan en la mejora de la infraestructura para lograr ese objetivo.

D. Uso o aprovechamiento de bienes del dominio público como cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales

Las descargas provenientes del riego agrícola están exentas del pago de derechos por el uso o aprovechamiento de bienes nacionales como cuerpos receptores de aguas residuales.¹⁷

Es en este rubro en donde se encuentra la mayor contradicción de la Ley Federal de Derechos, así como un preocupante incentivo para que los usuarios

¹⁵ Artículo 237-C.

¹⁶ “Situación de la gestión gubernamental y del marco regulatorio en materia de aguas nacionales”, noviembre de 2000, p. 2.

¹⁷ Artículo 282 fracción VI en relación con el artículo 276.

agrícolas no adopten medidas para tratar sus aguas residuales de forma previa a su vertimiento a los cuerpos receptores nacionales.

A través de esta exención, la Ley Federal de Derechos deja sin efecto alguno el principio de que el contaminador paga, por lo que a los usuarios agrícolas se refiere, trasladándose a la sociedad los costos de remediación de las aguas nacionales.

Asimismo, la referida exención tiene un efecto presupuestario adverso para la CNA, ya que por disposición de la propia Ley Federal de Derechos,¹⁸ los ingresos que se debieran obtener por la recaudación de derechos por este concepto, se destinarían a la CNA para la realización de obras de infraestructura de saneamiento por cuenca hidrológica.

Esta situación se agrava al considerar que más de la mitad del total de las aguas residuales que se descargan a nivel nacional provienen de usos agrícolas.

De la anterior exposición resulta evidente que el actual esquema de exenciones y subsidios al uso agrícola de las aguas nacionales representa un altísimo e injustificado costo social para el país, con graves repercusiones para el ambiente.

Como última consideración, si el agua ha sido declarada como un tema de seguridad nacional, la congruencia exige que se tomen de inmediato las acciones necesarias para la preservación de su calidad y cantidad, siendo la reforma a la Ley Federal de Derechos una de las medidas que requieren de atención prioritaria.

NORMAS OFICIALES MEXICANAS

Si bien existe un gran número de normas oficiales mexicanas, así como de normas mexicanas (voluntarias), relacionadas con el tema del agua, a continuación se expone una síntesis de tres de ellas que resultan de las más relevantes:

NOM-001-Semarnat-1996

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales y tiene por objeto proteger su calidad y posibilitar sus usos.

En la propia norma se establece también la forma y frecuencia en que los responsables deberán muestrear los contaminantes presentes en sus descargas.

Los contaminantes sujetos a regulación se encuentran especificados en dos tablas, en las que de forma individual se establece la concentración máxima permisible que podrá ser descargada a aguas y bienes nacionales.

¹⁸ Artículo 278-C.

La norma establece fechas diferenciadas y escalonadas para el cumplimiento con los límites máximos permisibles señalados, habiendo vencido la primera de ellas el 1° de enero de 2000, mientras que las otras dos vencerán el 1° de enero de 2005 y 2010 respectivamente.

Los plazos de vencimiento aplicables se determinan dependiendo de si se trata de descargas de tipo municipal o no municipal.

Tratándose de descargas de tipo municipal, el plazo de cumplimiento dependerá a su vez del número de habitantes del municipio en cuestión, mientras que para las descargas de tipo no municipal, se atiende al número de toneladas diarias de contaminantes presentes en las descargas.

Para la fecha en que venció el primer plazo de cumplimiento, es decir, el 1° de enero de 2000, 50% de las descargas no municipales y 75% de las descargas municipales incumplieron con esta norma.

A la CNA se le faculta para adelantar la fecha de cumplimiento respecto de cuerpos receptores específicos, mediante la realización de un estudio que lo justifique.

Por último, la inspección y vigilancia del cumplimiento con esta norma queda a cargo de la CNA.

NOM-002-Semarnat-1996

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, con exclusión de las descargas domésticas.

Su finalidad es la prevención y control de la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como la protección de la infraestructura de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

Su aplicación y vigilancia corresponde a las autoridades competentes de las entidades federativas, de conformidad con lo que establezcan sus respectivos ordenamientos legales.

Se establecen tres plazos diferenciados y escalonados de cumplimiento, atendiendo al número de habitantes del municipio de que se trate; el primero de dichos plazos venció el 1° de enero de 1999, mientras que los otros dos plazos vencen el 1° de enero de 2004 y 2009 respectivamente.

La autoridad local está facultada para fijar, de manera individual o colectiva, condiciones particulares de descarga, mediante las cuales se modifiquen los límites máximos permisibles, o bien, se establezcan otros no contemplados por esta norma.

Asimismo, la autoridad local está facultada para modificar los plazos de cumplimiento para descargas individuales o colectivas cuando éstas causen efectos nocivos sobre las plantas de tratamiento municipales; cuando las autoridades locales cuenten con compromisos contractuales y financieros para la operación de

plantas de tratamiento; en caso de que se declare una emergencia, y; en el supuesto de que con anterioridad a la publicación de esta norma existieran disposiciones locales estableciendo plazos de cumplimiento.

Los responsables de las descargas están obligados a realizar monitoreos periódicos y a conservar los registros por lo menos durante tres años.

Por último, se prohíbe descargar materiales o residuos peligrosos a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

NOM-003-Semarnat-1997

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público, teniendo como finalidad la protección del medio ambiente y de la salud de la población.

Esta norma es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables del tratamiento y reuso de las aguas residuales, así como para las terceras personas que presten este servicio.

Se establecen límites máximos permisibles de contaminantes diferenciados, dependiendo si el agua tratada se destinará a servicios al público con contacto directo o con contacto indirecto u ocasional.

Los responsables deben realizar un monitoreo periódico de las aguas tratadas y reusadas, debiendo conservar sus registros por lo menos durante tres años.

CONCLUSIÓN

En México existe un vasto catálogo de normas destinadas a regular el manejo de los recursos hidráulicos del país. La base de este conjunto de normas se encuentra en nuestra Constitución política y en los postulados sociales que ésta proclama para el ejercicio del derecho de propiedad privada. Este sistema, cuyo objetivo es regular la explotación, uso o aprovechamiento sustentable de las aguas nacionales, prevenir y controlar su contaminación, así como determinar los montos que deben pagar quienes se benefician de los servicios relacionados con el agua y sus bienes públicos inherentes, se integra no sólo con normas de carácter nacional, sino también con normas contractuales internacionales encaminadas a regular el uso equitativo de los recursos hidráulicos que nuestro país comparte con Estados Unidos. El último eslabón en esta cadena legislativa se integra por disposiciones de carácter técnico, es decir normas oficiales mexicanas, que establecen límites máximos de contaminantes en las aguas residuales.

Este sistema de normas sin embargo, es hoy insuficiente para responder a las necesidades que enfrenta nuestro país en esta materia. El contenido social en la explotación de nuestros recursos hidráulicos ha sido mal entendido y ha derivado en exenciones al uso agrícola de las aguas nacionales que amenazan seriamen-

te el aprovechamiento sustentable de este recurso. Con ello, nuestra legislación ha incentivado la sobreexplotación de nuestros yacimientos de agua, así como la falta de recursos para invertir en infraestructura de extracción, abastecimiento y tratamiento. Esta circunstancia ha impedido la realización en los hechos, de los principios de aprovechamiento sustentable y prevención de la contaminación del agua, plasmados en la LGEEPA. Del mismo modo, la escasez del recurso, derivado en gran medida por su uso ineficiente, ha orillado a nuestro país a incumplir sus compromisos internacionales en materia de agua. Es por lo tanto urgente, que las reformas legislativas que se avecinan contemplen esta problemática y doten al país de un sistema legal acorde a las necesidades del México de hoy, que garantice el uso sustentable de las aguas nacionales.

CIUDADANÍA Y GOBERNABILIDAD EN MÉXICO: EL CASO DE LA CONFLICTIVIDAD Y LA PARTICIPACIÓN SOCIAL EN TORNO A LA GESTIÓN DEL AGUA★

José Esteban Castro M., Karina Kloster y María Luisa Torregrosa

INTRODUCCIÓN

Este trabajo considera las interrelaciones entre la conflictividad social en torno a la gestión de los recursos hídricos y de los servicios de agua y saneamiento y el ejercicio sustantivo de los derechos de ciudadanía en México. En particular, tomamos como ejemplificación empírica el periodo que va de los años ochenta a la fecha, aunque también hacemos referencia a los procesos históricos relevantes que permiten comprender con mayor claridad las distintas dimensiones y factores involucrados en dichas interrelaciones. El sector del agua ha sido sujeto a profundas transformaciones institucionales en dicho periodo, las cuales a nuestro entender resultan de una serie de procesos vinculados, por una parte, a los cambios en el modelo de organización del estado y de la economía que han tenido lugar a nivel global desde fines de la década de los setenta y, por otro, a la necesidad de dar respuesta a la creciente conflictividad social en torno a la gestión del agua y de los servicios públicos esenciales de agua y saneamiento en México. En nuestra perspectiva, dicha conflictividad, expresada a través de diferentes formas de acción de la población que van desde la simple demanda burocrática por obtener una conexión a la red de agua hasta acciones violentas que resultan en la destrucción de infraestructura y en la pérdida de vidas humanas, forma parte de las luchas más amplias que buscan la democratización del Estado y el sometimiento de la gestión pública al control democrático de la ciudadanía.

En este sentido, uno de los componentes de dichas políticas de cambio ha sido el de afirmar la necesidad de una mayor participación de la población en la

★ Breves partes de este capítulo han sido publicadas como artículo en Castro (2002).

gestión del agua y de los servicios que con ella se relacionan. El capítulo examina algunos aspectos del debate acerca de la participación social, así como también las formas que la misma asume en la práctica concreta. Uno de nuestros argumentos centrales es que las explicaciones de la conflictividad social en el sector del agua derivadas de los modelos dominantes en política pública desde la década de los ochenta son insuficientes porque los mismos dejan fuera del análisis a una de las dimensiones explicativas centrales: el carácter social y político que asume la gestión de los recursos hídricos y de sus bienes y servicios derivados. Consecuentemente, en dichos enfoques dominantes, los factores clave que permitirían explicar el carácter antagonico que asume la relación entre la población y las instancias de gestión del agua y de sus servicios relacionados se ven reducidos a sus aspectos técnico-administrativos y físico-naturales, o se tornan completamente inobservables.

Entre otros ejemplos de lo que acabamos de afirmar, puede mencionarse el argumento de que las crisis crónicas y cíclicas que afectan a la gestión del agua y sus servicios en México, y que se reflejan en niveles elevados de conflictividad social, pueden explicarse por el hecho de que el agua continuaría siendo tratada como un bien público y no como un bien económico, privado. La solución asociada a este argumento ha sido el intento de mercantilizar y privatizar los recursos hídricos y sus servicios asociados. En nuestra perspectiva, este argumento se basa en una serie de presunciones con débil fundamento teórico y que carecen de base empírica. Por otra parte, desde una perspectiva teórica alternativa, que se ciñe con más rigor a la evidencia disponible, puede afirmarse que las políticas implementadas desde la década de 1980 a partir de dichos presupuestos no solamente no han producido las soluciones prometidas sino que además han exacerbado las desigualdades sociales existentes y, consecuentemente, la conflictividad social y política en el sector. Desarrollaremos esto con más detalle en el cuerpo del texto.

Otro argumento que examinamos críticamente es el que propone que la conflictividad se explicaría por las condiciones hidrogeológicas que afectan a la gestión de los recursos hídricos en gran parte del país. Aunque por supuesto no puede minimizarse el peso de los determinantes físico-naturales sobre las posibilidades y alcance de dicha gestión, estos factores han sido sobrenfatizados, junto con los aspectos técnicos y económicos, y han dejado de lado lo que en nuestra perspectiva constituye una de las raíces del problema: la existencia y reproducción de desigualdades socioeconómicas y políticas que determinan la exclusión de grandes sectores de la población del acceso a los servicios y bienes esenciales. En este sentido, tal como se demuestra más adelante, el fenómeno de la “escasez del agua” que frecuentemente se evoca en las explicaciones de la crisis no refleja el hecho de que los volúmenes promedio de agua extraídos y distribuidos diariamente superan con creces las necesidades mínimas de la pobla-

ción. Por ejemplo, en el Área Metropolitana de la Ciudad de México, el volumen de agua *per capita* distribuido diariamente es tres veces superior al recomendado para el consumo doméstico mínimo según estándares internacionales. Esto demuestra que el propio concepto de “escasez” frecuentemente utilizado es extremadamente relativo y apoya nuestro argumento de que la escasez real experimentada por millones de mexicanos es antes que nada el resultado de sus condiciones de indefensión frente al Estado, a los proveedores de agua públicos y privados, y a otros actores que ejercen el poder social y económico en la gestión del agua y de sus servicios.

En relación con esto, las reformas introducidas en el sector del agua en México desde la década de los ochenta han estado orientadas formalmente a revertir los problemas estructurales de ineficiencia e inequidad y han colocado el tema de la participación social en el centro del debate. Sin embargo, en la práctica el modelo de participación social promovido desde el Estado no ha dado respuesta a las demandas más acuciantes de la sociedad, lo cual ha prolongado las condiciones de la conflictividad, las que por otra parte se han visto exacerbadas en los últimos años por una serie de factores concurrentes. Dentro de este marco, nuestro trabajo es una invitación a la reflexión sobre las implicaciones de las políticas de reforma en el sector agua para la democratización de la gestión del agua y sus servicios, a la luz del conocimiento acumulado en las ciencias sociales en torno a los procesos de participación ciudadana. Como tal, intentamos contribuir a la clarificación de las interrelaciones entre la gestión del agua y sus servicios, las formas concretas y empíricamente verificables de participación social en el sector, y la profundización del ejercicio de derechos sustantivos de ciudadanía por parte de los mexicanos.

REFORMA INSTITUCIONAL Y PARTICIPACIÓN EN MÉXICO

Históricamente, el Estado ha jugado un rol central en la estructuración de la participación social en México, especialmente a través de la intervención estatal en relación con el movimiento popular. Esto nos sugiere que el análisis de la política de reforma del sector del agua dirigido desde el Estado debe prestar atención a los mecanismos de control y cooptación social que ha empleados tradicionalmente para conducir la lucha de clases e incidir sobre las formas de participación popular (Rello, 1990). En este sentido, por ejemplo, al hacer referencia a la participación social en los gobiernos locales como una forma de procesar las demandas de la ciudadanía se advierte que históricamente, desde los años cuarenta, se instala una fuerte estructura corporativa y partidaria que logra conducir dichas formas de participación. De esta manera, el sistema posrevolucionario creó y se sustentó en una estructura de representación social basada en las rela-

ciones capital-trabajo, en la cual sindicatos y empresarios se convirtieron en los principales actores alrededor de los cuales se formuló la política social para los asalariados. Para las grandes mayorías que no podían tener acceso a los bienes esenciales por la vía del mercado, las prácticas clientelares se convirtieron en la única opción y estos procesos contribuyeron a que la instancia municipal, en lugar de representar los intereses del conjunto de la sociedad local, formulara políticas, proyectos y acciones que terminaban beneficiando a los grupos de interés locales (Ziccardi, 1998, pp. 30-31). En gran medida, la gestión de los recursos hídricos y el acceso a los servicios de agua y saneamiento se convirtió precisamente en uno de los elementos claves del juego clientelar que ha marcado las formas de participación social en México.

En los últimos años la sociedad mexicana ha experimentado profundas transformaciones. Entre los cambios más radicales se encuentran precisamente las reformas a la legislación de tierras y aguas, orientadas fundamentalmente a crear el marco legal para la transformación de estos recursos en bienes privados, cuya distribución pueda confiarse al funcionamiento autorregulado del mercado (tabla 1). Un objetivo explícito de dicha política ha sido el de terminar con el modelo clientelar y paternalista que ha caracterizado a las relaciones entre el Estado y la sociedad en México. Estos cambios comienzan en la década de los ochenta, cuando ya se manifiesta con claridad la decisión del Estado mexicano de descentralizar la prestación de diversos servicios públicos, en particular el del agua potable, con lo cual se ponen en marcha una serie de cambios estructurales orientados a la creación de derechos de agua privados y a la gestión privada de los servicios públicos esenciales de agua y saneamiento. El primer paso se dio en 1980, cuando el gobierno federal entregó a los gobiernos estatales la operación de los sistemas de agua potable y alcantarillado, que en algunos casos fue transferida a su vez por los estados a los ayuntamientos.

TABLA 1
CAMBIOS INSTITUCIONALES EN LA GOBERNABILIDAD DEL SECTOR AGUA

<i>Año</i>	<i>Acción</i>	<i>Consecuencias</i>
1980	Descentralización de los servicios de agua potable y alcantarillado	Los servicios pasan de jurisdicción federal a estatal y, en menor medida, municipal
1982	Se transfiere la responsabilidad de la intervención federal en materia de agua urbana e industrial de la SARH a la SEDUE	Se crea una instancia de federal de regulación del desarrollo urbano y de la ecología y en ella se localiza la gestión del agua, particularmente para uso urbano-industrial
1983	Se reforma el Art. 115 Constitucional	Traspaso de la Federación a los municipios de la responsabilidad por la prestación de servicios de agua y saneamiento

1986	Se reforma la Ley Federal de Derechos	Se introducen cuotas. Se comienza a discutir el tema de la eficiencia y el costo de la gestión del agua
1989	Creación de la CNA dependiente de la SARH	Instancia que tendrá a cargo la gestión integral del agua ¹
1990	Se reforma la Ley Federal de Derechos	Actualización de las cuotas en el uso del agua
1991	Se reforma la Ley Federal de Derechos	Cobro por descarga de aguas residuales contaminadas
1992	Reforma al Art. 27 constitucional	Liberación de los mercados de tierra y agua
1992	Promulgación de la Ley de Aguas Nacionales ²	Posibilidad de dar lugar a la iniciativa privada
1993	Registro Público de Derechos de Agua (Repda)	Se inscriben los títulos de concesión, asignación y permisos para los derechos de agua (creación de mercados de agua)
1999	Reforma del Art. 115 constitucional	Libera aún más el mercado de agua, traspasa poder de concesión del Estado a los municipios

¹ En un primer momento, la CNA nace como órgano desconcentrado de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos; sin embargo, en 1994 se constituye en órgano desconcentrado de la recién creada Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Semarnap) que se transforma en el 2000 en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). Véase Axel Dourojeanni, 2001, CNA, 2001.

² En 1992, después de la significativa reforma constitucional, se promulgó la Ley de Aguas Nacionales como reglamentaria del Artículo 27 “que sostiene como objetivos fundamentales la administración integral del agua; la mayor participación usuaria y privada en el financiamiento, construcción y operación; la seguridad jurídica sobre los aprovechamientos, y el desarrollo integral sustentable del agua, sus bienes y sus servicios.” Por lo que respecta a la participación de empresas privadas, la ley ofrece el marco jurídico base para su participación en obras y proyectos hidráulicos que sean responsabilidad del Gobierno Federal. La ley considera la posibilidad de que la iniciativa privada participe en el financiamiento, construcción y operación de infraestructura hidráulica federal, así como en la prestación de los servicios correspondientes. Esta legislación representa un cambio central en relación con la anterior en materia de agua, porque precisa las responsabilidades gubernamentales en la materia y porque señala que el esfuerzo del sector público se puede complementar con la participación e inversión privadas, con el financiamiento, construcción y operación de infraestructura hidráulica federal.

Fuente: Torregrosa *et al.* (2003).

Con las reformas legales de 1992 se crean y consolidan los mecanismos diseñados para transferir la construcción, administración, distribución y conservación de los recursos hídricos a las instancias sociales y privadas, luego de un largo periodo de centralización estatal de los servicios. Las reformas a la ley también fortalecieron la política de modernización del sector hidráulico, iniciado desde fines de los años ochenta. Conjuntamente, se profundizaron las políticas de descentra-

lización y participación privada en el sector, reorientando de manera radical el papel de las instituciones públicas en el manejo y administración del recurso. En este contexto se llevó a cabo la transferencia de los distritos de riego a los usuarios de los mismos. Los distritos se dividieron en módulos de riego de acuerdo a la red secundaria, redes y caminos y en cada uno de ellos se constituyó una Asociación de Usuarios a los que la Comisión Nacional del Agua (CNA) otorgó un Título de Concesión de Agua y de Uso de la Infraestructura. Actualmente, existen alrededor de 309 asociaciones, que operan el servicio para riego en la red secundaria y parcelaria y 6 Sociedades de Responsabilidad Limitada, que operan la red primaria, en las que se agrupan 316 000 usuarios organizados, en una superficie de 2 386 809 ha.¹

En el caso del agua para uso urbano-industrial, la transformación no ha sido menos radical. En este sector se ha acentuado un proceso de descentralización de las instancias federales hacia las entidades federativas y la conformación de instancias a nivel regional. Por otro lado, se modificaron las funciones de los organismos operadores de agua potable y alcantarillado y sus instancias de administración. Así mismo se instrumentaron distintas formas de concesión a la iniciativa privada, por ejemplo la concesión del servicio en los casos de Aguascalientes, Cancún y Puebla, la contratación de servicios en el Distrito Federal, y las concesiones a empresas paramunicipales, como es el caso de la ciudad de Saltillo. Por una parte, el modelo buscaba superar la crisis financiera del sector público para la construcción de la infraestructura hidráulica mediante la incorporación del capital privado y, por el otro, la creación de nuevos espacios de gestión y concertación de intereses con la incorporación de componentes sociales y privados, ya no exclusivamente estatales, como es el caso de las Asociaciones de Usuarios de los Distritos de Riego, los Consejos de Cuenca, o los Comités de Solidaridad para la dotación de servicios de agua potable o drenaje.

Las reformas a la Ley de Aguas Nacionales buscaban consolidar a la CNA como organismo descentralizado y autónomo con el objetivo de implementar mecanismos institucionales que permitan aumentar la eficiencia distributiva en la gestión de los recursos hídricos mediante la asignación de derechos de propiedad privados sobre el agua y mediante un sistema de precios que incentive la inversión. En el nuevo modelo de gestión propuesto, aun cuando el agua sigue siendo un bien del dominio público de la federación a cargo del gobierno federal, los usuarios tendrían un mayor espacio de gestión bajo la supervisión de la CNA. Por ejemplo, el otorgamiento de títulos privados de propiedad sobre el agua busca la creación de mercados de agua, en los cuales se espera que la competen-

¹ Existen alrededor de tres millones de ha de riego en distritos, y otros tres millones en pequeña y mediana irrigación. En éste ámbito se han formado los Consejos de Acuífero, que en los últimos años se han acelerado con la instalación del Registro Público del Agua.

cia entre distintos usos introduzca incentivos para aumentar la eficiencia en la asignación del recurso. Este modelo busca establecer nuevas bases para refundar la relación entre la sociedad y el estado en la gestión de los recursos hídricos, a través de la cual la CNA se plantea el reto de promover una mayor participación de los usuarios y una nueva cultura del agua ya no basada en el usuario como derechohabiente de un Estado paternalista sino como propietario privado y consumidor de los bienes y servicios asociados con el agua.

Ahora bien, cabe señalar que las transformaciones esperadas a partir de las reformas institucionales mencionadas no se han materializado aún, mientras que problemas cruciales tales como la conflictividad social por el recurso y sus servicios se han incrementado de manera significativa en los últimos años. En particular, a medida que se acelera la expansión urbana, junto con ella crece la presión social por el recurso y los servicios con una demanda cada vez más fuerte por mayor participación por parte de la población. Las respuestas del estado a esta demanda creciente han asumido formas diversas. Por una parte, la CNA ha comenzado a impulsar un modelo de gestión integral de los recursos hídricos, en afinidad con el consenso predominante en el campo internacional sobre la materia (el modelo de Integrated Water Resources Management, IWRM), en el cual la participación ciudadana ocupa formalmente un lugar central. Como parte de esta política se crea el Movimiento Ciudadano por el Agua (Padua, 2002), una institución que busca promover la educación de la población y contribuir a establecer una nueva cultura del agua y que ha dado lugar a una serie de iniciativas tales como el Consejo Consultivo del Agua y los Consejos Ciudadanos Estatales, que se han venido a sumar a las asociaciones de usuarios, las ONG, y otras instancias preexistentes, y que actúan en distintos niveles de coordinación con el Estado a través de la propia CNA, la Semarnat, la SEP, y la Secretaría de Salud entre otros.

Por ejemplo, aunque el Consejo Consultivo del Agua se crea originalmente en marzo del año 2000 a partir de iniciativas del ejecutivo, en un acto formal que se llevó a cabo por el propio presidente de la República, el mismo es una organización de la sociedad civil que poco a poco atrajo el interés de un grupo de personas e instituciones altamente reconocidas y que tienen una especial preocupación por el cuidado y la conservación del agua. El Consejo esta constituido por asociaciones como ANEAS, el Consejo Nacional de la Publicidad, instituciones educativas como el TEC de Monterrey y la UNAM, y su papel principal es el de servir como organismo de apoyo consultor para la CNA. Esto significa que hay una labor constante y permanente de coordinación que se puso de manifiesto, por ejemplo, durante la elaboración del Programa Nacional Hidráulico en la cual miembros del Consejo Consultivo participaron activamente. Otras tareas del Consejo incluyen actividades de apoyo al proceso de cambio estratégico en el sector, a través de campañas publicitarias con el objeto de sensibilizar y

concientizar a la población en relación con la situación de los recursos hídricos en el país. Un esquema muy parecido se maneja a nivel de los estados por los Consejos Ciudadanos del Agua, los cuales también tratan de asumir un papel similar en los ámbitos locales y regionales.

Es importante resaltar, sin embargo, que aunque estas iniciativas reflejan ciertamente la preocupación por avanzar en el proceso de reforma del sector ampliando los espacios de participación social, el concepto de participación implícito en estas instancias sólo da cuenta parcial de las formas de participación social existentes en la práctica cotidiana de la gestión del agua y sus servicios. Por afuera de los canales institucionales, históricamente altamente restringidos en relación con el acceso por parte de la población, existe una amplia gama de formas mediante las cuales la población ha venido expresando sus preferencias y demandas y que suelen quedar fuera del alcance de las instancias de participación creadas y promovidas desde el estado. Examinemos brevemente un aspecto importante de dichas formas de participación, que tiene que ver con la conflictividad social en torno al agua y sus servicios.

LUCHA POR EL AGUA Y PARTICIPACIÓN CIUDADANA EN MÉXICO

En nuestra investigación sobre conflictividad en torno al agua y sus servicios (Torregrosa Armentia, 1988-1997; Castro, 1992, 1998) identificamos un amplio rango de iniciativas de la población, que van desde la presentación de demandas pacíficas ante las autoridades hasta confrontaciones violentas que terminan en la destrucción de infraestructura y en la pérdida de vidas humanas. Estos hechos fueron identificados a partir del análisis de informes de prensa durante el periodo 1985-1992, que arrojaron un número de alrededor de 2000 casos en la cuenca de México solamente. No podemos tratar los detalles aquí por razones de espacio, pero cabe señalar que el estudio cubre, además de las causas de la movilización que comentamos a continuación, los actores de las acciones, los destinatarios de la movilización (en gran medida individuos o instituciones percibidos por los actores como responsables por la situación que justifica su acción), los instrumentos de acción empleados y las consecuencias del hecho, es decir, el resultado objetivo de las confrontaciones registradas.

Las causas de los hechos son muy variadas y pueden agruparse en tres grandes temas: *a)* condiciones básicas de acceso a los servicios, que incluye acciones para superar los obstáculos (legales, administrativos, técnicos, etc.) al acceso tanto al servicio formal (por ejemplo, la conexión a la red de agua o de saneamiento) como al semiformal e informal (por ejemplo, servicios de pipas municipales o privados), *b)* estándares de servicio, que incluye problemas como la interrupción del servicio, falta de mantenimiento, incrementos de precios, ineficiencia admi-

nistrativa, abuso y especulación por parte de los piperos, etc., y *c*) aspectos sociopolíticos que tienen que ver con la gobernabilidad del recurso y los servicios, tales como disputas en torno a la extracción de recursos hídricos, confrontaciones sobre el control de sistemas de agua, etc. La tabla 2 ilustra el peso relativo de estas distintas categorías.

TABLA 2
CAUSAS DE LOS HECHOS POR EL AGUA-AMCM 1990-1992
(porcentajes comparativos)

	<i>Distrito Federal</i>	<i>Municipios</i>	<i>Total</i>
Acceso	32.1 (165)	28.2 (271)	30.0 (436)
Estándares	58.6 (301)	55.8 (525)	56.8 (826)
Aspectos sociopolíticos	9.3 (48)	15.4 (145)	13.3 (193)
Total AMCM	100 (514)	100 (941)	100 (1455)

Por su parte, los instrumentos empleados para llevar a cabo estas acciones pueden agruparse también en cinco grandes categorías: demandas, denuncias, movilización y paradas, amenazas de acción directa, y acciones directas (tabla 3). Las formas más comunes son la demanda y la denuncia, que involucran diferentes grados de antagonismo. La demanda normalmente se dirige a las autoridades o a las empresas de agua y saneamiento locales, por ejemplo para pedir la conexión o la restauración del servicio.

TABLA 3
INSTRUMENTOS EMPLEADOS POR LOS ACTORES-AMCM 1990-1992
(porcentajes comparativos)

	<i>Distrito Federal</i>	<i>Municipalidades</i>	<i>Total</i>
Demandas	5.3 (14)	5.3 (24)	5.3 (38)
Denuncias	80.3 (212)	66.5 (302)	71.6 (514)
Movilizaciones/paradas	7.2 (19)	10.6 (48)	9.3 (67)
Amenazas	5.7 (15)	9.3 (42)	7.9 (57)
Acciones directas	1.5 (4)	8.4 (38)	5.9 (42)
Total AMCM	100 (264)	100 (454)	100 (718)

Cuando el canal de la demanda formal fracasa, los actores frecuentemente recurren al segundo tipo de instrumento, las denuncias, que pueden ser dirigidas a las autoridades o a la prensa, y que tienen el objetivo de aumentar la presión y atraer la atención de la opinión pública para obligar a las autoridades a tomar una acción. Las denuncias son muy frecuentemente acompañadas por movilizaciones, paradas, y otras formas de demostración pública pacífica. Los otros instrumentos, la amenaza y la acción directa, obviamente representan una escalada en la confrontación y frecuentemente son el resultado, de acuerdo a los casos registrados, de la falta de atención a las demandas, lo cual en el periodo estudiado ocurría por largos espacios de tiempo. Estas acciones incluyen desde formas de desobediencia civil, tales como el no pago de las facturas del servicio o de impuestos, hasta acciones más sustantivas como el bloqueo de rutas, la ocupación de edificios, el secuestro de empleados municipales o de las empresas de agua y saneamiento o la destrucción de propiedad (vehículos, infraestructura, etc.). Según los registros de la prensa utilizados, a veces estas acciones también han derivado en la pérdida de vidas humanas, normalmente como resultado de la represión por parte de la fuerza pública u otros actores armados.

Es importante destacar que mientras que la mayor parte de los hechos producidos por usuarios domésticos tiene lugar abiertamente, en el espacio público, y por lo tanto son frecuentemente criminalizados, estigmatizados, o reprimidos por la fuerza pública, las acciones de grandes usuarios (por ejemplo industriales y comerciales) permanecen normalmente ocultas al escrutinio público. Por ejemplo, las actividades de *lobby* y presión política por parte de grandes usuarios de agua lograron demorar y finalmente debilitar el estricto código legal originalmente aprobado para castigar la extracción ilegal de agua y la falta de cumplimiento con las regulaciones en materia de descargas de agua residual no tratada. En el primer caso, en 1991 la Comisión Nacional de Agua había anunciado que aplicaría el rigor de la ley a los usuarios clandestinos de agua en el país, lo cual bajo la Ley Federal de Aguas de 1972 vigente implicaba la pena de prisión (véase, por ejemplo, *Uno más Uno*, 1991 y *El Universal*, 1991). Sin embargo, como resultado de las actividades de *lobby* y de la presión política, las autoridades prontamente cambiaron su actitud por un enfoque más tolerante hacia la ilegalidad. Este emblanecimiento fue posteriormente formalizado a través de un Decreto Presidencial el 11 de octubre de 1995, que otorgó una amnistía a los usuarios ilegales. Un segundo decreto, emitido el 11 de octubre de 1996, extendió aún más la amnistía para cubrir a nuevas categorías de usuarios ilegales (*Diario Oficial de la Federación*, 1995 y 1996). En el segundo caso, los usuarios industriales también lograron introducir cambios sustanciales a la regulación de afluentes a cargo de la Semarnap, y obtuvieron una considerable reducción de los estándares requeridos inicialmente. Esta degradación de la regulaciones para el desecho de agua residual en respuesta a las presiones del *lobby* industrial tuvo

repercusión internacional y atrajo la oposición de grupos ambientalistas y de *lobbies* estadounidenses que acusaron a México de “rebajar los estándares ambientales con el objeto de atraer o retener inversiones” (BorderLines, 1995).

Los ejemplos anteriores sirven para ilustrar no solamente las múltiples facetas de la conflictividad social en torno a la gestión del agua y sus servicios sino también las diversas formas de participación social existentes, a través de las cuales los usuarios y sus organizaciones han buscado consistentemente reorientar dicha gestión. En este contexto, como vimos al comienzo del capítulo, las reformas introducidas a partir de la década de los ochenta buscaron otorgar al Estado mexicano un papel más efectivo en el ejercicio del control estratégico de los recursos hídricos, destacándose la creación de la Comisión Nacional del Agua (CNA) en 1989 como organismo federal a cargo del manejo integral de los recursos. Una de las líneas de política centrales instituidas en el proceso fue la de promover la participación social en la gestión del recurso y de los servicios, así como también en la resolución de los conflictos, en reconocimiento de la necesidad de constituir un espacio de legitimidad para asegurar el éxito de las reformas. Ahora bien, uno de los obstáculos más importantes enfrentados por esta política, en nuestra perspectiva, ha sido que la misma se ha fundamentado en un concepto de participación instrumental, en la que se ha ignorado el carácter sociopolítico de la relación entre el Estado y la población. Por una parte, se ha intentado redefinir al usuario como consumidor y al ciudadano como cliente comercial que ya no posee un derecho al agua como bien esencial garantizado por el Estado sino que debe adquirir el agua como una mercancía más entre otras en el mercado. Por otra parte, en este modelo la participación social ha sido entendida como obediencia esperada por parte de la población a las decisiones tomadas por los expertos técnicos y financieros a cargo de las reformas y en gran medida, las iniciativas de promoción de la participación social han limitado la misma a la formación de instancias consultivas formadas por notables y por instituciones respetables que no bastan para dar cuenta de la enorme complejidad expresada a través de las formas de participación social más autónomas que surgen de la sociedad. Por esta razón, puede afirmarse, los niveles de conflictividad ilustrados anteriormente, y que han continuado con posterioridad al periodo de nuestro estudio, sugieren fuertemente que el concepto de participación, implícito en la política de reforma, no permite comprender la complejidad del proceso real de participación de la población en la gestión del recurso y de sus servicios. En realidad, los usuarios han demostrado una gran capacidad para obstaculizar, oponerse y modificar el curso de las reformas, no sujetándose al papel de consumidores y clientes y asumiendo una lucha activa, no siempre consciente de sus verdaderos alcances, con profundas consecuencias para la democratización de la gestión en el sector del agua.

Aunque muchas de las formas concretas que asumen las acciones de la población están lejos del ideal de participación democrática civilizada, el proceso debe analizarse en el contexto de las condiciones que el sistema político ofrece a la población para la expresión y canalización de sus preferencias y decisiones. Los procesos de exclusión de los sectores más desfavorecidos de la población y la persistencia de modelos tecnocráticos de gestión que interpelan a los usuarios en tanto consumidores y clientes y dejan de lado su carácter de ciudadanos con derechos, exacerban las condiciones de conflicto preexistentes y profundizan la incertidumbre en relación a los riesgos que enfrenta la población en relación con la gestión de los recursos hídricos y los servicios públicos esenciales.

LA CONFLICTIVIDAD SOCIAL EN LA GESTIÓN DEL AGUA Y SUS SERVICIOS

La conflictividad en torno a la gestión de los recursos hídricos y de sus bienes y servicios relacionados es un fenómeno que obviamente trasciende el escenario mexicano. En este sentido, la expectativa de que los conflictos en torno a la distribución y asignación de los recursos hídricos pasarán a “formar parte del paisaje del siglo XXI” se ha convertido en una preocupación prioritaria para la comunidad internacional.² En relación con esto, durante las últimas décadas expertos en seguridad internacional han venido señalando que el agua puede igualar o incluso superar al petróleo como fuente potencial de conflictos (Gleick, 1993). Hay razones importantes que apoyan este enfoque, tales como el hecho de que los recursos de agua dulce se encuentran distribuidos en forma muy desigual e irregular en el planeta, con grandes regiones que sufren de extrema escasez de agua. Se estima que menos de una decena de países controlan cerca de 60% del agua dulce del planeta, mientras que alrededor de 300 cuencas fluviales y lacustres y un gran número de acuíferos subterráneos tienen jurisdicción compartida por dos o más países, lo cual genera condiciones de gran complejidad e incertidumbre en la gobernabilidad de la gestión de dichos recursos (Ohlsson, 1992; Samson y Charrier, 1997).

Ahora bien, la incertidumbre más extrema que se plantea es la de si existe suficiente agua dulce en el mundo para satisfacer las necesidades de todos los seres humanos. En particular, el agua necesaria para la agricultura, que actualmente da cuenta de 70% del consumo mundial de agua dulce, constituye un tremendo desafío: por un parte, se estima que el mantenimiento de la seguridad alimentaria demandará un incremento en la extracción de agua estimado entre

² Hans van Ginkel, subsecretario general de las Naciones Unidas durante el Simposio del Agua de Estocolmo, 13 de agosto de 2001 (*Financial Times*, 14 de agosto de 2001, p. 6.).

el 15 y 20% hasta el año 2025, mientras que al mismo tiempo se considera que para frenar el proceso de desertificación y preservar recursos hídricos actualmente en peligro se debería reducir la extracción de agua en aproximadamente 20% durante el mismo periodo. Es difícil avizorar cómo, dado el estado actual del conocimiento y la tecnología, será posible lograr ambos objetivos en forma simultánea. Ahora bien, aunque la cantidad total de agua dulce disponible es ciertamente una cuestión crucial y legítima, un examen más detenido muestra que la disponibilidad de agua como tal no es el problema más importante y que probablemente no lo será en el futuro inmediato. Una serie de investigaciones recientes sugiere que, al menos en términos de volúmenes, existe suficiente agua fresca en el planeta para satisfacer las necesidades de todos los seres humanos (Samson y Charrier, 1997). Sobre esta base, se acepta cada vez más el hecho que la verdadera incertidumbre en relación a la gestión del agua se centra en nuestra capacidad para implementar sistemas de control, distribución y acceso al recurso y sus servicios derivados que garanticen tanto la legitimidad política como la eficiencia y la equidad social. Este es un problema crucial, dada la certeza creciente de que la conflictividad en torno al control de recursos hídricos y el acceso a ellos persistirá e inclusive aumentará en los próximos años.

Comprensiblemente, existe un cuerpo de literatura creciente sobre “conflictos por el agua”, en el cual se tiende a enfatizar los así llamados aspectos “no militares” de la seguridad internacional (es decir, elementos que pueden convertirse en blancos de la acción militar), entre los cuales los recursos hídricos y las infraestructuras de gestión del agua ocupan un lugar prominente. Similarmente, otros autores han explorado la función del cambio medioambiental, sea de origen antropogénico o no, como causa de conflictos sociales y políticos, en los cuales el agua también ocupa un lugar central (Homer-Dixon, 1991). Aunque la mayor parte de esta literatura se ocupa de confrontaciones internacionales en torno al control y la gestión del agua, también existe una creciente preocupación con la dimensión intranacional de estos conflictos. Entre otros problemas, a pesar de los esfuerzos hechos desde la década de los ochenta por la comunidad internacional, “hoy existen más personas que carecen de agua potable que hace dos décadas” (Gorbachev, 2000). Dado que el agua es un factor esencial en el ejercicio del derecho humano universal a “un estándar de vida adecuado para [...] la salud y el bienestar”³, es evidente que los gobiernos confrontan crecientemente la amenaza de conflictos sociales y políticos a partir de las demandas de la población por un suministro adecuado y regular de agua.

En nuestra perspectiva, este último aspecto del problema —la dimensión intranacional de los conflictos por el agua— ha recibido mucha menos atención hasta ahora. No obstante, existen contribuciones importantes sobre este tema, in-

³ Artículo 25, Declaración Universal de los Derechos Humanos.

cluyendo por ejemplo la literatura sobre “seguridad del agua”, la cual toma como uno de sus puntos de partida las bases teóricas y metodológicas desarrolladas por la investigación sobre seguridad alimentaria y presta especial atención a los vínculos y contradicciones entre distintas características del agua: como recurso natural, como derecho universal, y como mercancía (Webb e Iskandarani, 1998). Algunos de estos autores examinan las correlaciones entre pobreza, discriminación de género y étnica y la carencia de acceso a los servicios de agua y drenaje sanitario que afectan a grandes sectores de la población mundial, y siguen el enfoque de los “derechos ambientales”, el cual se inspira parcialmente en los trabajos de Amartya Sen sobre las relaciones entre la pobreza y el hambre (Sen, 1981; Mearns, 1995; Gaspar, 1993; Gore, 1993).

En el marco de este debate general, nos interesa destacar la línea teórica que se sitúa en la convergencia entre la ecología política y la economía ecológica, herederas a su vez de tradiciones clásicas de las ciencias sociales, con su énfasis en temas de justicia ambiental en relación con conflictos ecológicos distributivos (Redclift y Benton, 1994; Harvey, 1996; Camacho, 1998; Dobson, 1998; Guha y Martínez Alier, 2000; Martínez Alier, 2002; Swyngedouw, Kaika y Castro, 2002). Un elemento fundamental de estos enfoques es que los problemas ambientales tienen una base profundamente enraizada en procesos socioeconómicos, políticos y culturales y por lo tanto no pueden reducirse a su dimensión tecnológica o físico-natural. Dentro de este mismo marco, nuestro trabajo enfatiza precisamente el hecho de que a pesar de los formidables avances tecnológicos, para dar un ejemplo, en los campos de la ingeniería hidráulica o la biotecnología aplicada al tratamiento de agua para uso humano, grandes sectores de la población mundial continúan sufriendo la falta de acceso a este recurso en las cantidades y calidades requeridas para una supervivencia digna, y esto ocurre inclusive en áreas donde el recurso abunda.

Como se mencionó previamente, aunque de manera formal la mayor incertidumbre en relación con el agua es si existe suficiente agua dulce en el planeta para satisfacer las necesidades de todos los seres humanos, en realidad, la cuestión crucial tiene que ver con la equidad en el acceso al recurso. Es un hecho bien documentado que inclusive donde existe “suficiente” agua, grandes cantidades de seres humanos no logran tener acceso al mínimo necesario para sostener condiciones de vida dignas.⁴ Tomando las conclusiones de Amartya Sen sobre el problema análogo del hambre, “la escasez significa que las personas no tienen suficiente

⁴ Por ejemplo, Guayaquil, la mayor ciudad de Ecuador, cuenta con el río Guayas que atraviesa su casco urbano y sin embargo 35% de la población no tiene acceso al sistema de agua potable, que por otra parte está sujeto a interrupciones crónicas. Una estructura de desigualdad social arraigada, políticas clientelar y la colusión entre las autoridades y los empresarios privados que venden agua en la ciudad son los principales factores que permiten explicar las deficiencias del servicio,

[...], no significa que no hay suficiente. Mientras que esto último puede ser causa de lo anterior, lo anterior puede ser el resultado de muchas causas” (Sen, 1981, p. 1). En la perspectiva de Sen, la clave para comprender por qué la gente padece de hambre no está en la disponibilidad de alimentos *per capita* sino más bien en la capacidad que los individuos y las familias tienen para acceder a los mismos, una situación que Sen denominó el “problema de la adquisición” (*the acquirement problem*, Sen, 1990, pp. 36-37). El argumento de Sen sobre la independencia entre la producción de alimentos *per capita* y las hambrunas ilumina el problema análogo de la relación entre la producción de agua *per capita* (es decir, agua extraída, tratada y distribuida para consumo humano) y la expansión de morbi-mortalidad relacionadas con la falta de agua en calidad y cantidad mínimamente adecuadas. Avanzando más allá de este debate, la cuestión es que un volumen adecuado de producción de agua *per capita* no garantiza que los individuos y las familias tendrán un acceso equitativo ¿o siquiera mínimo? a los servicios de agua y saneamiento.⁵

En las sociedades crecientemente urbanas, el agua ha pasado a constituirse en uno de los bienes de consumo esenciales que los individuos y las familias deben garantizarse para sobrevivir. Por desgracia, el reconocimiento formal del derecho al agua, que en fecha reciente ha sido muy apropiadamente adoptado como un derecho humano fundamental por las Naciones Unidas (UN, 2002), no garantiza un acceso regular a dicho recurso. Tal como ha ocurrido históricamente con otros derechos, como el derecho al trabajo, a la vivienda o a la salud, que han sido incorporados en la carta de derechos ciudadanos de algunos países, dicho otorgamiento no garantiza a las personas el disfrute permanente de un trabajo adecuado, de una vivienda digna, o de servicios de agua y saneamiento para toda su vida. La transición de los derechos formales al disfrute concreto de los beneficios asociados con los mismos está determinada por un gran número de factores: por ejemplo, las personas pueden ser afectadas por la pérdida temporal o permanente de sus medios básicos de subsistencia y, consecuentemente, verse imposibilitadas de ejercer sus derechos en la práctica.

las cuales son a su vez la causa de recurrentes tensiones y conflictos sociales y políticos (Swynge-douw, 1995). Esta descripción podría también generalizarse a muchas otras ciudades de países menos desarrollados.

⁵ Por ejemplo, el volumen de agua distribuida en el Área Metropolitana de la Ciudad de México alcanza un promedio de 300 litros por persona por día (pppd), bastante más que el estándar mínimo aceptado internacionalmente de 100 litros pppd. Sin embargo, mientras que en algunos barrios el consumo de agua pppd supera los 1000 litros en promedio, en amplias áreas de la metrópolis millones de personas deben conformarse con un promedio de 5-10 litros pppd durante largos periodos, a lo cual debe agregarse que el agua que reciben es frecuentemente inadecuada para el consumo humano (Castro, 2002). 100 litros pppd es el volumen considerado mínimamente adecuado para satisfacer necesidades básicas tales como beber, lavarse y cocinar (Clarke, 1991, p. 19).

En gran medida, la vulnerabilidad de las poblaciones humanas con respecto a las incertidumbres y peligros relacionados con la gestión del agua y sus servicios está íntimamente asociada a las condiciones de desigualdad que afectan a grandes sectores sociales. Como lo expresara sarcásticamente uno de los protagonistas de las luchas urbanas por el agua que nos ha tocado en suerte estudiar en la cuenca de México, “en algunos barrios la estación seca ha durado ya más de quince años” (*Metrópoli*, 1989; véase también Restrepo, 1995). Claramente, la escasez crónica de agua a la que millones de personas se ven sometidas por largos periodos no es el producto “natural” del ciclo hidrológico, sino que es más bien el resultado del carácter social que asumen los procesos físico-naturales. En este sentido, a pesar del enorme avance tecnológico alcanzado en el campo de la gestión del agua, la producción y reproducción de desigualdades sociales arraigadas continúa siendo un factor determinante de la incertidumbre que enfrenta la especie humana en relación al agua. Dicha incertidumbre, en nuestra perspectiva, halla su expresión más transparente en los procesos de confrontación y lucha social y política en torno a la distribución y acceso a dicho recurso y sus servicios. Esto, por otra parte, nos confronta con una serie de cuestiones en torno a las relaciones entre la gestión del agua, la ciudadanía, y la participación, que exploramos a continuación.

AGUA Y CIUDADANÍA: LOS VÍNCULOS

La relación entre, por una parte, el acceso a los recursos hídricos y a los servicios públicos esenciales de agua y saneamiento y, por otra parte, el ejercicio de los derechos de ciudadanía, que implica fundamentalmente el derecho a participar plenamente en la vida social y política de la comunidad, tiene varias facetas. En primer lugar, cabe mencionar el carácter de bien público y de derecho universal que el acceso al agua para consumo humano esencial ha tenido y tiene en distintas culturas, y que ha sido heredado por los sistemas de derechos ciudadanos modernos. En el caso particular de México puede mencionarse como ejemplo la legislación de aguas colonial española, que es el antecedente directo de la legislación mexicana de aguas moderna, la tradición legal árabe, que ejerció una influencia crucial en la legislación española de aguas, y las tradiciones precolombinas en relación con el manejo del recurso (Glick, 1970; Meyer, 1997). Posteriormente, el principio de bien público esencial y universal del agua para uso humano se incorporó en la Constitución revolucionaria de 1917, en la cual se estableció formalmente la universalidad en el acceso al agua y a la tierra para todos los mexicanos (Lanz, 1982; Farías, 1993). A escala global, este carácter de derecho universal y transgeneracional del acceso al agua para usos humanos esenciales se confirmó en la Conferencia del Agua de las Naciones Unidas en

1977, que declaró que toda persona “tiene el derecho al acceso a agua potable en cantidad y calidad equivalentes a sus necesidades básicas” (ONU, 1977). Y más recientemente, las Naciones Unidas han declarado que el agua es “un bien público fundamental para la vida y la salud. El derecho humano al agua es indispensable para vivir una vida en dignidad humana. Es un prerequisite para la realización de otros derechos humanos” (ONU, 2002). Estos aspectos del acceso al agua y a sus servicios esenciales derivados están íntimamente entramados con el desarrollo de los derechos civiles y sociales de la ciudadanía en su concepción moderna occidental. Por otra parte, existe también otro vínculo fundamental entre agua y ciudadanía, que involucra la gobernabilidad de los recursos hídricos y de los servicios de agua y saneamiento, ya que la misma se encuentra íntimamente entrelazada con el ejercicio del derecho ciudadano básico a participar en las decisiones que tienen que ver con la gestión pública de la vida comunitaria, incluyendo la gestión de los recursos naturales y de los servicios públicos esenciales. El ejercicio de los derechos políticos de la ciudadanía implica, entre otros aspectos, la participación activa de los ciudadanos en las decisiones relativas al control y distribución de los recursos y servicios, lo cual requiere entre otras condiciones la existencia de instituciones y prácticas que garanticen la legitimidad política y el control democrático de dicha gestión.⁶

Ahora bien, notoriamente, el reconocimiento formal del derecho al agua no ha garantizado el acceso de la población al recurso y a sus servicios derivados. En realidad, dicho acceso continúa siendo negado a una gran proporción de la población humana, mientras que la morbi-mortalidad relacionada con el agua sigue siendo una de las mayores causas de sufrimiento. Se estima que más de cinco millones de personas mueren anualmente por causa de enfermedades prevenibles relacionadas con el agua (Comisión Europea, 2002; Organización Mundial de la Salud, 2003), mientras que alrededor de 1 100 millones de personas (17% de la población mundial) no tiene acceso a servicios de agua potable y 2 400 millones (40% del total) no cuenta con servicios sanitarios básicos (Comisión Europea, 2002b). México no es una excepción a esto, y según los expertos del sector salud durante la década de los noventa, inclusive en el Área Metropolitana de la Ciudad de México, las enfermedades relacionadas con el agua, tales como diarreas, cólera, viruela, y malaria seguían siendo causas de muerte aunque oficialmente las mismas habían sido declaradas como erradicadas (Jiménez Ornelas, 1995, pp. 26-27; Cifuentes *et al.*, 1999).

Esto ilustra claramente las contradicciones existentes entre la enunciación formal de derechos ciudadanos, tal como el derecho al agua, y las prácticas concretas que de hecho anulan la posibilidad de un ejercicio efectivo de los dere-

⁶ Ofrecemos un análisis más detallado de estos vínculos entre el agua y los derechos ciudadanos en otros trabajos (Castro, 1998, 1998b, 2003b).

chos por parte de amplios sectores de la población. En este sentido, México presenta un ejemplo clásico dado que aunque el derecho al agua y la responsabilidad del estado para garantizar servicios públicos esenciales se instituyeron en la Constitución de 1917, en la práctica el desarrollo del país se caracterizó por una “dinámica interna de la desigualdad” (González Casanova, 1965, p. 87) que excluyó a amplios sectores del ejercicio efectivo de sus derechos ciudadanos. En este sentido, cabe señalar que la universalización de los servicios de agua y saneamiento no constituyó una prioridad de política pública hasta bien entrados los años setenta (Wilkie, 1967, p. 169; Perló Cohen, 1989), y todavía hoy a comienzos del siglo XXI la promesa revolucionaria de acceso universal y control democrático sobre los recursos hídricos y sus servicios relacionados continúa siendo una promesa incumplida.

Este proceso de exclusión, por su parte, ha sido correspondido históricamente con procesos de lucha por parte de la población, la cual ha recurrido a una amplia gama de acciones de protesta y presión en relación con la gestión del agua y sus servicios. Estas luchas de la población han tenido lugar en el contexto de una creciente movilización en torno a problemas urbanos y ambientales, un proceso que tomó gran fuerza a partir de los grandes desastres ocurridos en la Área Metropolitana de la Ciudad de México a mediados de la década de los ochenta, las explosiones de San Juanico en 1984 y los terremotos de 1985. Estos hechos contribuyeron significativamente a la toma de conciencia por parte de la población de su indefensión en relación con los riesgos derivados del manejo de los recursos naturales y de la gestión urbana, incluyendo los servicios públicos esenciales. Esta toma de conciencia se ha manifestado, entre otras formas, en una amplia movilización social en torno a estos temas en la cual el agua y sus servicios han ido cobrando una importancia fundamental.

PARTICIPACIÓN Y GOBERNABILIDAD EN LA SOCIEDAD DEL RIESGO

Existe una amplia literatura reciente que trata el tema de la participación ciudadana en relación con las transformaciones introducidas en el campo de la gestión de los recursos naturales y de servicios públicos esenciales. En buena medida, esta literatura se ha centrado en los procesos que se pusieron en marcha mediante las políticas de desregulación, liberalización y privatización de la gestión de recursos naturales y servicios públicos desde mediados de los años ochenta. Algunos autores han descrito estas transformaciones como el pasaje desde un modelo basado en el “monopolio estatal”, que caracterizó las políticas de desarrollo y gestión hasta fines de la década de los setenta, hacia un “pluralismo pragmático” en el que una amplia gama de actores participan democráticamente en la gestión de los bienes y servicios esenciales para la vida social (Esman,

1991). Posiblemente, uno de los elementos clave en esta literatura —inspirada largamente en la perspectiva neoliberal sobre la reforma del Estado aunque no reductible al marco de pensamiento neoliberal—⁷ ha sido el reconocimiento del carácter multiescalar y multisectorial de los regímenes de gestión.

De acuerdo con estos autores, el sistema de gobernabilidad democrático incluye las formas clásicas de autoridad estatal (organizadas jerárquicamente), pero también incorporan las formas de gestión características de los sectores privado (competencia mercantil) y voluntario (participación social) (PNUD, 1997; Picciotto, 1997).⁸ En este sentido, el modelo de la gobernabilidad democrática y plural consistiría en una combinación de estructuras jerárquicas, dinámicas participativas, acción asociativa y mecanismos de mercado, y estaría basado principalmente en una cultura de diálogo, negociación, ciudadanía activa, subsidiariedad y fortalecimiento institucional (Comisión Europea, 2001). En el discurso más corriente, este modelo de la gobernabilidad es frecuentemente presentado como un sistema ideal, basado en una simetría de poder entre el estado, el mercado y la sociedad civil (figura 1). Este modelo idealizado se encuentra en la base de las nociones de “sociedad público-privada” y “sociedad tripartita” (en referencia a sociedades entre el sector público, el privado y la sociedad civil) que se han empleado crecientemente a partir de la década de los años noventa para referirse a la gestión de servicios públicos esenciales.

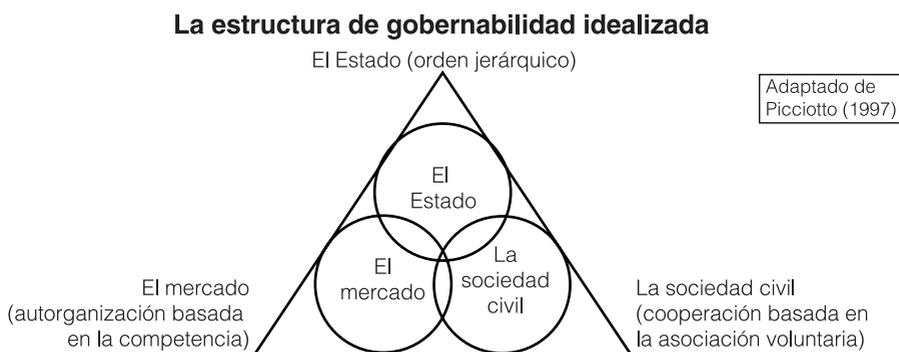


FIGURA 1. La estructura de gobernabilidad idealizada.

⁷ Para una consideración de perspectivas alternativas sobre “gobernabilidad” en relación con la gestión del medio ambiente, véase Lafferty *et al.* (1996), Hanf y Jansen (1998) y Pierre (2000).

⁸ Véase también el concepto de “gobernabilidad de intereses” propuesto por Streeck y Schmitter en relación con lo que estos autores consideran un cuarto modelo de orden social, el modelo asociativo, el cual funciona conjuntamente con las características tradicionales del Estado (jerarquía), la comunidad (dinámicas participativas) y el mercado (la libre competencia) (Streeck y Schmitter, 1985). También véase el concepto de “arreglos institucionales policéntricos” aplicado por Elinor Ostrom *et al.*, a la gestión de los recursos naturales (Ostrom, 1990).

Cabe recordar que este debate surge asociado a la crisis de representatividad de las democracias liberales que se plantea a partir de la década de los años sesenta con la irrupción de poderosos movimientos sociales que emergen a la escena pública reivindicando nuevas formas de “hacer política” y de expresar sus intereses, cuestionando la ineficiencia de la burocracia estatal y la existencia de desigualdades sociales crecientes en un contexto de crisis económicas sin precedentes. Una de las respuestas a esta crisis de legitimidad estatal ha sido la política de descentralización del Estado en asociación con la promoción de formas de participación ciudadana originales en un esfuerzo por compensar el fracaso de los canales tradicionales de representación y participación política. En este sentido, las políticas estatales de descentralización y de fomento a la participación ciudadana pueden interpretarse como un intento de relegitimar el sistema democrático canalizando la presión social en aumento hacia la construcción de formas estatales más incluyentes. Algunos autores han sugerido que las principales tendencias que derivaron en esta crisis de legitimidad y eficacia del Estado habrían sido la declinación de las instituciones de mediación política y social, lo que habría contribuido a erosionar las fuentes tradicionales de formación de consenso, por un lado, y por otro, la percepción negativa del ascenso y consolidación de una burocracia estatal con elevado poder discrecional en las décadas de posguerra. De este modo y en teoría, la promoción de la participación ciudadana ofrecería una alternativa al modelo paternalista preexistente, involucrando a los ciudadanos tanto en la gestión como así también en el financiamiento de los servicios públicos, contribuyendo de esta forma a dar respuesta a la crisis política y fiscal del estado de bienestar (Cunill, 1991, pp. 10-15). Desde otro ángulo, este enfoque *top down* de la participación ciudadana aparece también vinculado a las estrategias de “achicamiento del Estado” impulsadas por las políticas de desregulación, liberalización y privatización que han sido implementadas desde la década de los ochenta. En este contexto, dichas políticas se han presentado como consustanciales a la democracia y al proceso de democratización del Estado, ya que las mismas permitirían en teoría la ampliación del campo de derechos y libertades, la progresiva incorporación de los sectores excluidos o marginados a las instituciones representativas y un mayor control y participación populares en la actuación de las administraciones públicas.

Ahora bien, no puede dejarse de lado el carácter central de los procesos de lucha social que han dado lugar a estrategias alternativas, muchas veces contradictorias, a este modelo idealizado de la gobernabilidad. En conexión con esto, un aspecto crucial del debate actual sobre la gobernabilidad en general, y sobre la gobernabilidad de recursos naturales y servicios públicos esenciales en particular, es la relación entre la toma de conciencia creciente por parte de la población acerca de las “incertidumbres fabricadas” que caracterizan lo que el sociólogo Ulrich Beck ha conceptualizado como la “sociedad del riesgo” contemporánea

(Beck, 1992a,b; 1998) y las modalidades que asume el ejercicio de los derechos de ciudadanía, un espacio en el que se ha dado una inflación de formas que ahora también incluyen los derechos “tecnológicos”, “ecológicos”, y “medioambientales” entre otros (Frankenfeld, 1992; Steenbergen, 1994; Newby, 1996; Mehta, 1998). El debate ha contribuido a la mayor especificación y expansión de las categorías tradicionales de la ciudadanía tal como fueran establecidas por el sociólogo británico T. H. Marshall⁹ para incluir el derecho a la información y al consentimiento informado, además del derecho a la participación ciudadana en estos temas.

Existe una serie de cuestiones que pueden plantearse en el marco de este debate. Si el riesgo tiene que ver con la toma de conciencia de amenazas y peligros cada vez más sofisticados e indeterminados que afectan a la vida humana, y si los sujetos de la sociedad del riesgo son definidos en términos de dicha toma de conciencia, ¿no significa esto que la sociedad del riesgo también implica formas cada vez más variadas y sofisticadas de producción y reproducción de desigualdades sociales? ¿Cómo podría alcanzarse un nivel adecuado de toma de conciencia y participación de la población, por ejemplo en la gestión de cuencas o en la gestión de los servicios de agua potable, drenaje urbano y saneamiento, en vista de la creciente cantidad y complejidad de la información en los campos de conocimiento relevantes? ¿No significa esto también que, en los escenarios previsibles, tanto el impacto real de los peligros y amenazas así como el espectro cada vez más amplio de sus posibles trayectorias tenderá a seguir (predeciblemente) un patrón de distribución muy sesgado, tal como lo sugieren las consecuencias de la mayoría de los grandes desastres tales como inundaciones, sequías, interrupciones masivas de los servicios de agua y saneamiento, o la persistencia de elevados grados de morbi-mortalidad relacionados con la carencia o deficiencia de servicios esenciales, que normalmente afectan en especial a los sectores más indefensos de la sociedad? ¿Qué relación existe entre el modelo idealizado de la gobernabilidad democrática tal como se lo presenta en la literatura y las prácticas concretas de los actores sociales que forman parte del entramado de la gobernabilidad (el Estado, el sector privado orientado al mercado y la sociedad civil)? Por otra parte, y retomando el caso específico que analizamos en este trabajo, ¿cuáles son las implicaciones del modelo implementado en el sector del agua en México desde los años ochenta en relación con la promoción de la participación social con el objeto de reducir la desigualdad y aumentar la eficiencia en la gestión del agua y sus servicios? ¿Hasta qué punto las estrategias del Estado por promover la participación pueden generar las condiciones de inclusión

⁹ Marshall elaboró lo que se ha convertido en el modelo clásico para el estudio sociológico de la ciudadanía y sugirió que existen tres tipos principales de derechos: civiles, políticos y sociales (Marshall, 1992).

necesarias para el ejercicio sustantivo de los derechos ciudadanos? ¿En qué medida dichas estrategias representan solamente un intento por parte del Estado por crear condiciones de legitimidad para su política de reforma?

En este sentido, se reconoce crecientemente que, contrariamente a lo predicado por el modelo de la gobernabilidad democrática que ha acompañado a los programas de reforma estatal desde mediados de los años ochenta, los procesos reales han conducido a un incremento sustantivo de la desigualdad económica y social en los países en desarrollo, y particularmente en América Latina, agudizando las asimetrías de poder ya existentes. Según el Banco Interamericano de Desarrollo, a fines de la década de los noventa América Latina era la región más desigual del mundo (IDB, 1998), una tendencia que se ha confirmado desde entonces (Perry *et al.*, 2003). Con frecuencia, lo que en la retórica de estos programas se denomina “participación ciudadana”, en la práctica se ha reducido a una expectativa de obediencia por parte de la población a decisiones tomadas sin el debido debate público, las cuales normalmente se presentan como hechos consumados. Existen numerosos ejemplos de lo anterior, entre los cuales resalta por su brutalidad el caso boliviano, donde se ha intentado implementar reformas que alienan a amplios sectores de la población y que han producido una serie de verdaderas explosiones sociales. En marzo del año 2000, una movilización popular en contra de la privatización de los recursos hídricos y de los servicios de agua esenciales en Cochabamba obligó a la renuncia del gabinete federal en su conjunto, con la sola excepción del presidente de la Nación, Hugo Bánzer (Laurie, *et al.*, 2003). Al momento de escribirse este artículo, octubre de 2003, una revuelta social sin precedentes en el último medio de siglo en ese país ha tenido entre sus causas la protesta por la política de privatización del agua y el gas, conducida por el gobierno federal sin atender a la opinión y preferencias de amplios sectores del país, uno de los más pobres de América Latina, llevando a la renuncia de la mayor parte del gabinete y finalmente del presidente Sánchez de Lozada. Otros ejemplos, menos dramáticos desde la perspectiva de la pérdida de vidas humanas pero no por ello menos sustantivos, han tenido lugar en un número creciente de países en desarrollo, incluyendo Argentina, Brasil, México, Panamá y Perú, entre otros casos latinoamericanos, donde el común denominador es la movilización de la población, con métodos muy variados, en respuesta a la falta de canales adecuados de participación por medio de los cuales poder ejercer sus derechos ciudadanos.

LA PARTICIPACIÓN INSTITUCIONALIZADA: ALGUNAS REFLEXIONES FINALES

Si bien las reformas iniciadas en el sector del agua desde la década de los ochenta en México han estado formalmente orientadas a promover y facilitar la par-

ticipación social en la gestión del recurso y en la resolución de los conflictos en torno a dicha gestión y a la de los servicios de agua y saneamiento, en la práctica dichas políticas no han logrado el impacto esperado. Como ilustramos con el ejemplos de la política de promoción de la participación implementada por el gobierno en el sector del agua, en gran medida el modelo de participación propuesto se limita a la creación de instancias consultivas conformadas por actores individuales e institucionales de relevancia social, pero sin crear todavía canales institucionales estables, confiables y eficientes que permitan a la población hacer un ejercicio sustantivo de los derechos ciudadanos en el control democrático de la gestión del recurso y sus servicios. Cuando estos canales existen, con frecuencia su existencia se limita a las coyunturas político-electorales, de duración efímera, que no se cristalizan en instituciones de protección a los derechos ciudadanos y que pronto dejan lugar al retorno de las viejas formas clientelares.

Un ejemplo de esto último se da en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, y especialmente en el Distrito Federal, donde con el recambio político-institucional en la década de los noventa se comenzó a poner en práctica una serie de políticas institucionales *sui generis* en respuesta a la creciente demanda ciudadana por soluciones originales que permitieran garantizar la gobernabilidad necesaria para la vida urbana civilizada. Sin embargo, con el paso del tiempo se ha producido un resurgimiento *aggiornado* de métodos de cooptación y control de la participación social por parte del Estado, como por ejemplo la combinación de la figura del líder gestor (surgido en el marco del modelo corporativo) con la del sistema de partidos tal como se da en la búsqueda y promoción por parte de las autoridades de líderes-gestores de las demandas ciudadanas que sean afines al gobierno local. De este modo, en la selección de estos agentes se prioriza la labor de los militantes del partido oficial y en caso de que surjan demandas cívicas independientes o dirigidas por otro partido, se busca crear liderazgos paralelos que recojan las banderas de la población. De esta manera, se continúa desestimando la participación social sustantiva y autónoma en el diseño y ejecución de políticas sociales novedosas, en la labor vecinal local y en el trabajo comunitario constructivo, y se cae en un modelo que sólo responde a presiones políticas ejercidas directamente desde el centro del sistema de poder, creando una pauta mediante la cual el gobierno de la ciudad se mueve al ritmo de las manifestaciones encabezadas por algunos sectores sociales que reciben trato especial (Carrión, 1986, pp. 69-80).

Como estos ejemplos lo demuestran, debe hacerse una distinción clara entre las formas de participación institucional promovidas por las autoridades y las formas de participación ciudadana más autónomas. En la primera categoría se puede enumerar estructuras de participación tales como comités de vecinos de manzanas, de colonias, de subdelegaciones y delegaciones, así como comisiones de planeación en las que participan urbanistas y diferentes profesionistas. Todas

estas organizaciones vecinales y comunitarias demandan bienes y servicios urbanos, atienden las demandas más inmediatas de la ciudadanía y son sus intermediarios ante el gobierno local. Sin embargo, crear vías institucionales para la participación social no garantiza que los ciudadanos sean protagonistas del diseño y formulación de las políticas locales. Por el contrario, muchas veces dichas iniciativas son solamente estrategias para legitimar las políticas formuladas por la burocracia, tanto del gobierno local como de otras instancias del gobierno (Ziccardi, 1998, pp. 28-29).

Por otra parte, la incapacidad de los gobiernos de turno para encontrar soluciones a través de la participación social genuina y que no pasen meramente por el disciplinamiento de la sociedad y por la exigencia de obediencia a las decisiones tomadas por las autoridades y por los expertos, continúa generando diversos tipos de conflictos, en su mayoría resultantes de las presiones de la población que continúa resistiendo la política de la desigualdad a la que ha sido sometida históricamente. La búsqueda de soluciones necesariamente debe pasar por una combinación de liderazgos políticos, sociales y técnicos con la creación de consensos alrededor de las políticas y estrategias de acción propuestas, tomando en cuenta el juego de las fuerzas sociales y políticas así como también la eficiencia de sus formas de organización y de articulación de intereses. La diversidad de la sociedad mexicana obliga imperiosamente a la superación de las formas históricas de participación vertical, organizadas funcionalmente a partir de las estructuras corporativas, y a una convocatoria a formas de participación más incluyentes, que permitan canalizar la presión social por mejores condiciones de vida en formas más humanas, civilizadas, y equitativas. En este sentido, la diversidad de costumbres y modos de vida de la población exige también un esfuerzo para llegar a un conocimiento más riguroso de las preferencias y necesidades culturalmente específicas de los distintos grupos sociales, tomando en cuenta que los llamados a la participación tienen un fuerte peso sobre las identidades colectivas y tienden a promover los valores de la solidaridad social y a movilizar recursos locales. Es necesario buscar la integración de las preferencias específicas de las comunidades para evitar el error histórico de la imposición autoritaria de modelos y prácticas carentes de legitimidad y, consecuentemente, condenados al fracaso y a la desobediencia civil.

SIGLAS

ANEAS	Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento
SARH	Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos
SEDUE	Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología
Semarnap	Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca

Semarnat	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEP	Secretaría de Educación Pública
TEC	Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México

REFERENCIAS

- Barry, J., 1999, *Environment and Social Theory*, Londres, Routledge.
- Beck, Ulrich, 1992a, *Risk Society*, Londres, Sage.
- Beck, Ulrich, 1992b, "From industrial society to risk society", *Theory, Culture and Society*, 9 (1), pp. 97-123.
- Beck, Ulrich, 1998, "Politics of risk society", en Franklin, J. (ed.), *The Politics of Risk Society*, Cambridge y Oxford, Polity Press, pp. 9-22.
- Benaiges, Ana María, 1990, "Organización de la población y el servicio de agua y saneamiento", en *Coloquio Ciudadagua Andina*, Federación Municipal de Ciudades Unidas, Quito, Ecuador, pp. 26-33.
- BorderLines, 1995, *SEMARNAP Quietly Scuttles Key Environmental Regulation*, 3 (11), diciembre (<http://americaspolicy.org/borderlines/1995/bl19/bl19eia.html>).
- Borja, Jordi, 1989, "Participación ¿para qué?", *Revista Urbana*, 9, Caracas Venezuela, pp. 25-44.
- Brook Cowen, Penelope J. y Tyler Cowen, 1998, "Deregulated private water supply: a policy option for developing countries", *Cato Journal*, 18 (1), pp. 21-41 (<http://www.cato.org/research/natur-st.html>).
- Cajarville, Sergio, *La promoción de la participación en los programas de acción al nivel local*.
- Camacho, S. (ed.), 1998, *Environmental Injustices, Political Struggles. Race, Class, and the Environment*, Londres, Duke University Press.
- Carrión, Fernando, 1986, "Ciudades intermedias y poder local en Ecuador: una aproximación analítica", en Carrión, Diego et al., *Poder local, participación pública y administración urbana en ciudades intermedias y pequeñas en América Latina*, Ciudad / CLACSO, Quito, Ecuador, pp. 67-88.
- Castro, J.E., 1992, *El conflicto por el agua en México. Los casos de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas y Ciudad Juárez, Chihuahua, 1986-1991*, Tesis de Maestría en Ciencias Sociales, México, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO).
- Castro, J.E., 1995, "Decentralization and modernization in Mexico: the management of water services", *Natural Resources Journal*, 35 (3), pp. 1-27.
- Castro, J.E., 1998a, *Water, Power, and Citizenship. Contemporary Struggles in the Valley of Mexico: a Long-Term Perspective*, Tesis doctoral en Ciencia Política, Universidad de Oxford.
- Castro, J.E., 1998b, "La lucha por el agua y los derechos sociales de ciudadanía: el caso del Valle de México", en *Tèoria e Pesquisa*, 24-27 (ISSN 0104-0103), Revista del Departamento de Ciências Sociais (CECH), Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, Brasil, pp. 7-64.

- Castro, J.E., 1999, "El retorno del ciudadano. Los inestables territorios de la ciudadanía en América Latina", *Perfiles Latinoamericanos*, 14, pp. 39-62.
- Castro, J.E., 2002, "La construcción de nuevas incertidumbres, tecnociencia y la política de la desigualdad: el caso de la gestión de los recursos hídricos", *Revista Iberoamericana de Ciencias, Tecnología, Sociedad e Innovación*, 2, Organización de Estados Americanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura (<http://www.campus-oei.org/revistactsi/numero2/esteban.htm>).
- Castro, J.E., 2003a, "Socio-political and cultural factors affecting private participation projects in water and sanitation services", en el informe del proyecto *Barriers to and conditions for the involvement of private capital and enterprise in water supply and sanitation in Latin America and Africa: seeking economic, social, and environmental sustainability (Prinwass)*, European Commission 5th Framework Programme, INCO-DEV, Universidad de Oxford.
- Castro, J.E., 2003b, "Urban water and the politics of citizenship: the case of the Mexico City Metropolitan Area (1980s-1990s)", *Environment and Planning A* (<http://www.pion.co.uk/ep/>). En prensa.
- Centre for Interdisciplinary Research, ZIF, 2001, "Theoretical background. State of the art: citizenship, participation and social positioning in different legal contexts", en *International and Interdisciplinary Workshop: Communicating Citizenship in Decision Making Procedures. Towards an Interdisciplinary and Cross-Cultural Perspective*, junio 27-30, 2001, Bielefeld, University of Bielefeld.
- Cifuentes, E., J. Hernández-Ávila, L. Venczel y M. Hurtado, 1999, "Panorama of acute diarrhoeal diseases in Mexico", *Health and Place*, 5, pp. 247-255 (<http://www.insp.mx/cisp/censa/agua/trad5.php>).
- Clarke, R., 1991, *Water. The International Crisis*, Londres, Earthscan Publications.
- Cohen, J.L. y A. Arato, 1994, *Civil Society and Political Theory*, Cambridge, Mass. y Londres, The Massachusetts Institute of Technology (MIT) Press.
- Comisión Europea, 2001, "Achieving sustainable and innovative policies through participatory governance in a multi-level context", en *Progress Report, Framework V: Programme Project*, Bruselas, Comisión Europea.
- Comisión Europea, 2002a, "EU Water Initiative: Water for Life. Health, Livelihoods, Economic Development, Peace, and Security", *Bruselas* (http://europa.eu.int/comm/research/water-initiative/index_en.html).
- Comisión Europea, 2002b, "Water Management in Developing Countries: Policy and Priorities for EU Development Cooperation. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament", *Bruselas* (http://europa.eu.int/eur-lex/en/com/cnc/2002/com2002_0132en01.pdf).
- Comisión Nacional de Agua, 1994, *Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento*, México, CNA.
- Comisión Nacional de Agua, 2003, *Reunión con la Gerencia de Consejos de Cuenca de la CNA*, 6 de enero, México, CNA.
- Coulomb, R., 1991, "La participación popular en la provisión de los servicios urbanos. ¿Estrategias de sobrevivencia o prácticas autogestionarias?", en Scheingart, M. et al. (eds.), *Servicios urbanos, gestión local y medio ambiente*, Méxi-

- co, El Colegio de México/Centro di Ricerca e Documentazione Febbraio, 74, pp. 265-280.
- Coulomb, R., 1993, "La participación de la población en la gestión de los servicios urbanos: ¿privatización o socialización?", en Azuela, A. *et al.*, *Gestión urbana y cambio institucional*, México, UAM-A-UNAM, pp. 15-30.
- Cunill, Nuria, 1991, *Participación ciudadana*, Centro Latinoamericano de Administración para el Desarrollo, Venezuela.
- Diario Oficial de la Federación (DOF)*, 1995, México, 11 de octubre, pp. 7-13.
- Diario Oficial de la Federación (DOF)*, 1996, México, 11 de octubre, pp. 25-31.
- Dobson, A., 1998, *Justice and the Environment. Conceptions of Environmental Sustainability and Dimensions of Social Justice*, Oxford, Oxford University Press.
- Dobson, A. (ed.), 1999, *Fairness and Futurity*, Oxford, Oxford University Press.
- Douglass, Mike y John Friedmann (eds.), 1998, *Cities for Citizens. Planning and the Rise of Civil Society in a Global Age*, Chichester, John Wiley & Son.
- Dourojeanni, Axel-Jouravlev Andrei, 2001, "Motivos que retardan la gestión integrada del agua", en *Crisis de gobernabilidad en la gestión del agua*, CEPAL, ECLAC, Chile.
- Doyle, T. y D. McEachern, 1998, *Environment and Politics*, Londres, Routledge.
- El Universal*, 1991, 15 de julio, p. 39, México.
- Esman, M.J., 1991, *Management Dimensions of Development: Perspectives and Strategies*, West Hartford, Kumarian Press.
- Fals Borda, Orlando, 1988, "El nuevo despertar de los movimientos sociales", en *Seminario Nacional de Participación Comunitaria: Participación Comunitaria y cambio social en Colombia*, Departamento Nacional de Planeación, Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia, Asociación Colombiana de Sociología y Centro de Investigación y Educación Popular, Editorial Presencia Ltda., Bogotá, Colombia.
- Fariás Hernández, U., 1993, *Derecho mexicano de aguas nacionales*, México, Editorial Porrúa.
- Fischer, F. y M.A. Hajer (eds.), 1999, *Living with Nature. Environmental Politics as Cultural Discourse*, Oxford, Oxford University Press.
- Fischer, F. y M. Black (eds.), 1995, *Greening Environmental Policy. The Politics of a Sustainable Future*, Londres, Paul Chapman Publishing.
- Foster, John B., 2000, *Marx's Ecology. Materialism and Nature*, Monthly Review Press, Nueva York.
- Frankenfeld, P.H., 1992, "Technological Citizenship: a Normative Framework for Risk Studies", *Science, Technology and Human Values*, pp. 459-484.
- García Guadilla, M.P. y J. Blauert (eds.), 1992, *Environmental Social Movements in Latin America and Europe: Challenging Development and Democracy*, Londres, MCB University Press.
- Ghai, D. y J. Vivian, 1992, *Grassroots Environmental Action. People's Participation in Sustainable Development*, Londres, Routledge.
- Glick, T.F., 1970, *Irrigation and Society in Medieval Valencia*, Cambridge, Mass., Harvard University Press.

- Global Water Partnership, GWP, 2003, *Effective Water Governance. Learning from the Dialogues*, Stockholm, GWP, International Council for Local Environmental Initiatives (ICLEI), and UNDP.
- Goldman, M. (ed.), 1998, *Privatizing Nature. Political Struggles for the Global Commons*, Londres, Pluto Press.
- González Casanova, Pablo, 1965, *La democracia en México*, México, Era.
- González Posso, Camilo, 1988, "Comunidad y Estado: participación ciudadana y participación comunitaria para el desarrollo", en *Seminario Nacional de Participación Comunitaria: Participación Comunitaria y Cambio Social en Colombia*, Departamento Nacional de Planeación, Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia, Asociación Colombiana de Sociología y Centro de Investigación y Educación Popular, Editorial Presencia Ltda. Bogotá, Colombia.
- Guha, Ramachandra y Joan Martínez Alier, 2000, *Varieties of Environmentalism. Essays North and South*, Londres, Earthscan. Rep.
- Hanf, K. y A. Jansen (eds.), 1998, *Governance and Environment in Western Europe*, Harlow, Addison Wesley Longman.
- Harvey, David, 1996, *Justice, Nature and the Geography of Difference*, Oxford, Blackwell.
- Interamerican Development Bank, IDB, 1998, *Facing up to Inequality in Latin America. Economic and Social Progress in Latin America*, Washington D.C., IDB.
- Jiménez Ornelas, René, 1995, *La desigualdad de la mortalidad en México: tablas de mortalidad para la República Mexicana y sus entidades federativas, 1990*, México D.F. y Cuenavaca, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM y Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias.
- Keil, Roger, D.V. Bell, P. Penz y L. Fawcett (eds.), 1998, *Political Ecology: Global and Local*, Londres, Routledge.
- Lafferty, W. y J. Meadowcroft (eds.), 1996, *Democracy and Environment: Problems and Prospects*, Londres, Edgard Elgar.
- Lanz Cárdenas, José Trinidad, 1982, *Legislación de Aguas en México (Estudio Histórico-Legislativo de 1521 a 1981)*, 4 vols., Tabasco, Consejo Editorial del Gobierno del Estado de Tabasco.
- Laurie, Nina, C. Crespo Flores y C. Ledo, 2003, "Caso de Estudio Cochabamba", en informe del proyecto *Barriers to and conditions for the involvement of private capital and enterprise in water supply and sanitation in Latin America and Africa: seeking economic, social, and environmental sustainability (Prinwass)*, European Commission 5th Framework Programme, INCO-DEV, Universidad de Newcastle, Reino Unido y Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba.
- Lee, Terence R., 1999, *Water Management in the 21st Century*, The Allocation Imperative Cheltenham, Edward Elgar.
- Marshall, T.H., 1992, "Citizenship and Social Class", en Marshall, T.H. y T. Bottomore, *Citizenship and Social Class*, London and Concord, Mass., Pluto Perspectives, pp. 3-51.

- Martínez Alier, Joan, 2002, *The Environmentalism of the Poor. A Study of Ecological Conflicts and Valuation*, Cheltenham (RU) y Northampton, MA., Edward Elgar.
- Martins, H., 1996a, "Hegel, Texas: temas de filosofía e sociología da técnica", en *Hegel, Texas e Outros Ensaios de Teoria Social*, Lisbon, Século XXI, pp. 167-198.
- Martins, H., 1996b, "Tecnologia, modernidade e politica", en *Hegel, Texas e Outros Ensaios de Teoria Social*, Lisbon, Século XXI, pp. 199-249.
- Martins, H., 1998, "Risco, incerteza e escatologia -reflexões sobre o experimentum mundi tecnológico en curso", *Episteme*, 1 (1), pp. 99-121.
- McGranahan, Gordon, P. Jacobi, J. Songsore, Ch. Surjadi y M. Kjellén, 2001, *The Citizens at Risk. From Urban Sanitation to Sustainable Cities*, Londres, Earthscan.
- Mehta, M., 1998, "Risk and decision making: a theoretical approach to public participation in techno-scientific conflict situations", en *Technology and Society*, 20 (1), pp. 87-98.
- Melucci, Alberto, 1999, "Las teorías de los movimientos sociales", en *Acción Colectiva, vida cotidiana y democracia*, El Colegio de México, Centro de Estudios Sociológicos, México.
- Metrópoli*, 1989, 30 de mayo, p. 2, México.
- Meyer, M.C., 1997, *El agua en el suroeste hispánico. Una historia social y legal 1550-1850*, México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS) (publicado primero en inglés en 1984 por University of Arizona Press, Tucson, Arizona).
- Michel Díaz, Marco A., 1990, "Consideraciones sobre gestión pública y participación social en el proceso de modernización de las ciudades", en Perló Cohen, Manuel, *La modernización de las ciudades en México*, IIS UNAM, México, pp. 449-463.
- Nash, K., 2000, *Contemporary Political Sociology. Globalization, Politics and Power*, Oxford, Blackwell Publishers.
- Newby, H., 1996, "Citizenship in a green world: global commons and human stewardship", en Bulmer, M. y A. Rees (eds.), *Citizenship Today. The Contemporary relevance of T.H. Marshall*, Londres, UCL Press, pp. 209-221.
- Ohlsson, L. (ed.), 1992, *Regional Case Studies of Water Conflicts*, Göteborg, Peace and Development Research Institute (Padrigu), University of Göteborg.
- Organización de las Naciones Unidas, ONU, 1977, *Report of the United Nations Water Conference*, Mar del Plata, ONU.
- Organización de las Naciones Unidas, ONU, 2002, *The right to water (articles 11 and 12 of the International Covenant on Economic, Social, and Cultural Rights)*, Nueva York, ONU (<http://www.citizen.org/documents/ACF2B4B.pdf>).
- Organización Mundial de la Salud, 2003, "Emerging Issues in Water and Infectious Disease", Ginebra, OMS (http://www.who.int/water_sanitation_health/emerging/en/).

- Ortiz Rendón, Gustavo, Flor Cruz y Juan Carlos Valencia, 1999, Aspectos relevantes de la política del agua en México, en el marco del desarrollo sustentable, (http://www.imta.mx/aemex_articulo.phtml).
- Ostrom, E., 1990, *Governing the Commons. The Evolution of Institutions for Collective Action*, Cambridge, Nueva York y Melbourne, Cambridge University Press.
- Padua, Soraya, 2002, "Participación ciudadana en la gestión del agua, movimiento ciudadano por el agua", en *Congreso Anual ANEAS*, Colima, México.
- Perló Cohen, M., 1989, "Historia de las obras, planes y problemas hidráulicos en el Distrito Federal: 1880-1987", en *Informe de Taller de Investigación*, 6, México, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM-IIS).
- Perló Cohen, M., 1990, "El papel de los usuarios en la toma de decisiones del sistema hidráulico", en Perló Cohen, M. (ed.), *La Modernización de las ciudades en México*, México, UNAM-IIS, pp. 119-137.
- Perry, Guillermo, E. Francisco, H.G. Ferreira y Michael Walton, 2003, *Inequality in Latin America and the Caribbean: Breaking with History?*, Washington, World Bank (<http://wbln0018.worldbank.org/LAC/lacinfoclient.nsf/Category/By+Category/32D7C0BACEE5752A85256DBA00545D3F?OpenDocument>).
- Petrella, R., 2001, *The Water Manifesto. Arguments for a World Water Contract*, Londres, Zed Books.
- Picciotto, Robert, 1997, "Putting institutional economics to work: from participation to governance", en Clague, Christopher K. (ed.), *Institutions and Economic Development: Growth and Governance in Less-developed and Post-socialist Countries*, Baltimore y Londres, John Hopkins University Press.
- Pierre, J. (ed.), 2000, *Debating Governance. Authority, Steering and Democracy*, Oxford, Oxford University Press.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD, 1997, *Governance for Sustainable Growth and Equity*, Nueva York, PNUD.
- Redclift, M. y T. Benton (eds.), 1994, *Social Theory and the Global Environment*, Londres, Routledge.
- Rello, Fernando, 1990, "El control institucionalizado de la participación popular y su papel en la construcción de una sociedad y un estado nacional: el caso de México", en *Revista Diálogo*, 2, UNSRID, pp. 29-40.
- Restrepo, Iván (ed.), 1995, *Agua, Salud y Derechos Humanos*, México, Comisión Nacional de Derechos Humanos (CNDH).
- Samson, P. y B. Charrier, 1997, *International freshwater conflict. Issues and prevention strategies*, Geneva, Green Cross International.
- Steenbergen, B., 1994, "Towards a global ecological citizen", en Steenbergen, B. Van (ed.), *The Condition of Citizenship*, Londres, Sage, pp. 141-152.
- Streeck, W. y Ph. Schmitter, 1985, *Private Interest Government*, Londres, Sage.
- Swyngedouw, E.A., 1995, "The contradictions of urban water provision", *Third World P Review*, 17 (4), pp. 387-405.

- Swyngedouw, E.A., 1997, "Power, nature and the city. The conquest of water and the political ecology of urbanization in Guayaquil, Ecuador, 1880-1980", *Environment and Planning A*, 29 (2), pp. 311-332.
- Swyngedouw, E.A., M. Kaika y J.E. Castro, 2002, "Urban water: a political-ecology perspective", en *Built Environment*, (ISSN 0263-7960), Número Especial sobre *Water Management in Urban Areas*, 28 (2), pp. 124-137.
- Tarrow, S., 1998, *Power in Movement. Social Movements and Contentious Politics*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Torregrosa Armentia, M.L. (coord.), 1988-1997, *Programa de Investigación sobre Agua y Sociedad*, México D.F. y Jiutepec, Morelos, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO) e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Torregrosa Armentia, M.L., F. Saavedra, E. Padilla, A. Quiñones, K. Kloster, G. Cosío y Ch. Lenin, 2003, "Caso de estudio Aguascalientes", en informe del proyecto *Barriers to and conditions for the involvement of private capital and enterprise in water supply and sanitation in Latin America and Africa: seeking economic, social, and environmental sustainability (Prinwass)*, European Commission 5th Framework Programme, INCO-DEV, FLACSO-México.
- Uno Más Uno*, 1991, 21 de junio, p. 19, México.
- Webb, P. y M. Iskandarani, 1998, "Water insecurity and the poor", en *Discussion Papers on Development Policy*, Bonn, Center for Development Research.
- Wilkie, J.W., 1967, *The Mexican Revolution: Federal Expenditure and Social Change since 1910*, Berkeley y Los Angeles, University of California Press.
- Zenil, Mónica Eugenia, 1998, *La huella de la participación social*, Tesis para optar al grado de Maestría en Ciencias Sociales, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO) México.
- Ziccardi, Alicia, 1998, *Gobernabilidad y participación ciudadana*, México, UNAM, Instituto de Investigación Social, Porrúa.

CAPACIDAD AUTOGESTIVA PARA LA ADMINISTRACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO: LA TEORÍA Y PROBLEMÁTICAS EXTERNAS

*Jacinta Palerm Viqueira, María Rivas, Claudio Ávalos Gutiérrez
y José Luis Pimentel Equihua*

RESUMEN

En la primera parte desarrollamos la relación entre infraestructura de riego y organización social, con particular atención en los límites de la capacidad autogestiva en la construcción y administración de obras de regadío. Concluimos que, en la gran obra hidráulica, existe una capacidad autogestiva con el gobierno de los regantes y la operación por personal técnico contratado; en la pequeña y mediana tanto el gobierno como la operación dependen de los regantes.

En la segunda parte desarrollamos un conjunto de problemas relacionados tanto con la intervención por el Estado como con su ausencia que afectan de manera importante la capacidad autogestiva de administración de sistemas de riego: tales como los cambios en la legislación de aguas durante el siglo XX y principios del XXI, la intervención con la promoción de nuevas formas organizativas, un marco normativo inadecuado relativo a la competencia entre usos del agua.

PRIMERA PARTE. RIEGO Y ORGANIZACIÓN SOCIAL: PROPUESTAS TEÓRICAS

Todas las grandes civilizaciones antiguas: Mesopotamia, Egipto, la India, China, Mesoamérica, los Andes— tuvieron un componente de control del agua. Hay varias razones para este vínculo estrecho entre civilización y regadío, primera, para tener clases sociales no directamente productivas es necesaria la producción de excedentes lo que es posible con la agricultura de riego —en muy pocos casos la agricultura de secano es capaz de producir excedentes agrícolas sin animales de tracción. El auge de la agricultura de secano se daría a partir del invento del arado y de los aparejos para los animales de tracción.

Segunda, es necesaria, no sólo la capacidad técnica de producción de excedentes, sino también los mecanismos de coerción para que se produzcan. Como han señalado algunos antropólogos existen mecanismos sociales de resistencia a la producción de excedentes (Sahlins, 1977) o, al no presentarse las condiciones materiales, la estructura de autoridad —y la producción de excedentes— es efímera (Leach, 1976).

Tercera, las obras hidráulicas, su construcción, mantenimiento, manejo y, en el caso del regadío, la distribución del agua obliga a una cohesión social donde el individuo queda sujeto a la colectividad. Sin cohesión social simplemente no se construye o, una vez construida, no perdura la obra hidráulica.

Cuarta, la dimensión de la obra hidráulica y la complejidad de los conocimientos técnicos para la construcción de presas, canales, acueductos, galerías y otras obras implica la presencia e intervención de especialistas. La construcción misma requiere de planificación y de movilización de la mano de obra, que debido a la ausencia de maquinaria implica grandes contingentes. El mantenimiento y manejo de la obra hidráulica requieren a su vez de una administración continua; administración que incluye derechos de agua, es decir un marco legislativo y jurídico, así como la protección o defensa del agua frente a otros grupos (policía y ejército).

Todos estos requerimientos en sociedades en los albores de la civilización implican un enorme esfuerzo de inventiva tecnológica y organizativa, y cuanto mayor y más compleja la obra hidráulica mayores requerimientos organizativos.

La llamada “hipótesis hidráulica” (Wittfogel, 1966) propone que los especialistas en la construcción y administración de obra hidráulica: la burocracia hidráulica, se convierten en el núcleo de la clase gobernante de una sociedad donde el Estado es más fuerte que la sociedad, lo que denominaría Wittfogel: despotismo oriental.

La tesis de Wittfogel (1966) y la propuesta de “revolución urbana” de Childe (1954, s/f), que señalan a la agricultura de riego como base de la producción de excedentes y de la capacidad de coerción para que se produzcan tales excedentes, tuvieron un impacto muy importante en México al dirigir la investigación a la búsqueda de las bases materiales de las grandes civilizaciones prehispánicas, tal y como la evidencia de la construcción monumental (las pirámides y ciudades descritas por los conquistadores españoles) parecía indicar. Estas bases materiales debían ser, en referencia a la hipótesis hidráulica, una agricultura de regadío capaz de producir excedentes y que a su vez permitía y obligaba a una organización despótica, única organización capaz de movilizar grandes contingentes de trabajo para construir las pirámides y otras obras monumentales.

Los primeros esfuerzos de búsqueda se dirigieron a tratar de documentar *a)* la existencia de agricultura de riego (menciones explícitas de regadío y cultivos como el cacao, que en ciertas zonas climáticas de México se produce

necesariamente bajo regadío); *b*) la evidencia física de obra hidráulica (“acueductos”, canales, etc.) (Palerm, 1992; Armillas *et al.*, 1956 y Millon, 1957). El éxito de esta propuesta teórica en cuanto a los resultados de investigación que generó se encuentra hoy en día en una nueva visión del México prehispánico plasmada inclusive en los libros de texto gratuitos para la educación primaria.

Sin embargo para otro grupo de antropólogos y estudiosos de otras disciplinas, la propuesta de Wittfogel tuvo un impacto distinto: generó investigación para demostrar la falsedad de la hipótesis hidráulica, principalmente para demostrar, simplificando la tesis de Wittfogel, que el regadío no tiene que estar asociado a una administración por el Estado. Los estudios empíricos para poner a prueba esta “hipótesis hidráulica” son los primeros que señalan y analizan organizaciones autogestivas para la administración de sistemas de riego; y demuestran la capacidad autogestiva de los regantes para administrar sistemas de riego (por ejemplo: Maass y Anderson, 1976; Glick, 1970; Lansing, 1991; Martínez Saldaña y Palerm Viqueira, 1997; Palerm Viqueira y Martínez Saldaña, 2000 y Boelens y Dávila, 1998).

TABLA 1

1. No es necesario que el Estado opere el sistema de riego, los sistemas de riego pueden y son operados por los usuarios mismos de una forma democrática, es decir sin la necesidad de una autoridad burocrática externa (Maass y Anderson, 1976 y Millon, 1997).
2. La ausencia del Estado en el manejo del sistema de riego no implica una ausencia de autoridad (Hunt, 1997).
3. La presencia de autoridad interna puede ser manejada de una forma democrática, al impedir que sus autoridades tomen decisiones arbitrarias, con lo que la autoridad interna puede ser controlada por los regantes (Maass y Anderson, 1976).
4. Los regantes pueden defender sus intereses frente al Estado (Maass y Anderson, 1976).
5. La organización social para la construcción, conservación y reparto de agua de los sistemas de riego implica necesariamente una gran cohesión social con su contraparte de conflicto implícito (Maass y Anderson, 1976; Millon, 1997 y Millon *et al.*, 1997).
6. La ausencia de una institucionalización y tradicionalización de normas para el reparto de agua lleva a conflictos serios que hacen necesaria la intervención externa (Millon *et al.*, 1997) y aún existiendo esta normatividad institucionalizada puede estallar un conflicto serio, especialmente en casos de sequía (Millon, 1997).
7. La ausencia de una institucionalización y tradicionalización de normas para la movilización de los regantes para el mantenimiento del sistema de riego lleva al deterioro y eventual destrucción del sistema, a menos que intervenga el estado en este proceso (Millon, 1997).
8. Aún en los sistemas más tradicionalizados e institucionalizados se encuentra que el conflicto es un rasgo permanente del sistema (Millon, 1997 y Maass y Anderson, 1976); y se hace hincapié en que la organización social de los regantes debe ser capaz de resolverlos si el sistema va a tener continuidad (Maass y Anderson, 1976).
9. En casos de desaparición o deterioro de la autoridad centralizada propia de los regantes o externa, la tradicionalización e institucionalización de normas no parecen ser suficientes para evitar y/o resolver el conflicto y garantizar un sistema de riego sustentable (Mitchell, 1975).

Fuente: Martínez Saldaña y Palerm Viqueira (1997, pp. 6-8).

Conviene señalar que el impacto social de las demandas organizativas del regadío es un punto de consenso entre estos autores. La diferencia social entre agricultura de secano o de temporal y agricultura de regadío se evidencia tanto en Maass y Anderson (1976) y Hunt (1997) como en Wittfogel (1966): en el regadío hay una organización centralizada (en manos de los regantes o en manos del Estado), la organización es muy cohesiva y el individuo tiene que someterse a la colectividad. El punto de debate con Wittfogel está en las consecuencias de las demandas organizativas del regadío: la administración necesaria por el Estado. Como indica Hunt (1997), la intervención del Estado fue resultado de factores diversos, pero no resultado necesario de la misma obra hidráulica, sin embargo posible.

No obstante una serie de autores al referirse a la construcción de obra hidráulica —y ya no a su administración— coinciden o retoman el análisis de Wittfogel sobre el papel del Estado. Vaidyanathan (1985, 1999), Price (1994), Maass y Anderson (1976) señalan el hecho de la intervención directa del Estado en la construcción de gran obra hidráulica en el curso del siglo XX. Reisner (1986) señala el carácter “socialista” [por un Estado interventor] de la construcción de obra hidráulica en el oeste árido de Estados Unidos. Herrera y Lasso (1994), Palacios (1994), Maass y Anderson (1976) señalan la necesidad de la intervención directa del Estado en la construcción de gran obra hidráulica frente a la incapacidad o gran dificultad de los propios usuarios de construir.

Otros autores, como Worster (1985), insisten en que la tesis de Wittfogel es aplicable a las sociedades industriales modernas, tanto en el ámbito de la construcción como en el de la administración de la gran obra hidráulica. Worster en su análisis de los Distritos de Riego y de Conservación de Estados Unidos, en los que formalmente la autoridad se localiza en un comité electo por los usuarios, concluye que hay una administración burocrática y tecnocrática de los grandes sistemas hidráulicos.

En la misma línea que Worster, Vaidyanathan (1985) indica la necesidad de un cuerpo de especialistas de tiempo completo (burocracia) para administrar grandes sistemas y apunta que el factor crítico se encuentra, no en que sea una burocracia del Estado o contratada por los regantes, sino el control sobre la burocracia.

Para estos autores el énfasis ha pasado de la disyuntiva entre administración por el Estado o administración por los mismos regantes, a notar que no obstante quién tiene el gobierno del sistema de riego, el tipo de personal que opera el sistema. De tal manera que es una necesidad contar con especialistas de tiempo completo (burocracia) para la administración de grandes obras hidráulicas, y es

precisamente el control sobre la burocracia que establece los límites al “despotismo occidental”¹.

La diferencia en la interpretación sobre las capacidades autogestivas y el papel de la burocracia en la administración de gran obra hidráulica, se basa en diferencias analíticas, pero también en el tamaño y complejidad de la obra hidráulica. Worster (1985), Vaidyanathan (1985), Mabry (1996) apuntan a que existe una diferencia social entre el pequeño riego (la llamada hidroagricultura por Wittfogel) y la gran irrigación. Hay un límite necesario marcado por el tamaño y/o complejidad técnica de la obra hidráulica abajo del cual un sistema puede ser administrado sin personal técnico especializado, donde los regantes realizan ellos mismos las tareas fundamentales que impone el sistema de riego utilizando el cúmulo de conocimiento local para resolver problemas de operación (distribución del agua), organización del trabajo de los propios regantes para el mantenimiento, resolución de conflicto y monitoreo o vigilancia —ocupando ellos mismos todos los puestos necesarios. Estos casos corresponden a organizaciones compuestas por regantes que se caracterizan por ser agricultores de regadío minifundistas.

Comúnmente se acepta que esta situación comprende a sistemas que típicamente se han denominado como “pequeños” y “comunitarios”, pero también incluye a sistemas “medianos” y “multi-comunitarios”.

En una revisión de casos empíricos (Palerm Viqueira, 2001a) se encuentra que la línea de corte empírico entre ausencia y presencia de personal especializado contratado se presenta más allá de las 10 000 hectáreas, considerando un sistema de riego desde la obra de bocatoma de una fuente natural (tal definición excluye a las obras de cabecera como presas), por ejemplo un canal de la huerta de Murcia 12 762 hectáreas, un canal de la huerta de Valencia 7 000 hectáreas, posiblemente el canal de Lemoore en el río Kings 13 600 hectáreas, el Comité de Vigilancia de los ríos Atoyac y Nexapa 9 145 hectáreas, posiblemente también la Acequia Real del Júcar con 21 872 hectáreas, un caso en Nepal con 15 000 hectáreas, algunas de estas organizaciones antiquísimas otras de no más de 40 años.

Con frecuencia existe un nivel organizativo adicional, también sin personal especializado, que reúne a sistemas sobre un tramo de río: la huerta de Murcia 25 000 hectáreas, la huerta de Valencia 16 000 hectáreas. En el caso del canal de Lemoore la Asociación a la que pertenecen, con un total de superficie de riego

¹ “El agua fue y sigue siendo un objeto de poder fantástico en manos de pocos actores políticos y económicos. Así, fue inventado o aplicado el control social de los “beneficiarios” de perímetros construidos o incluidos dentro de esquemas de planificación hidráulica, en formas no muy diferentes de lo que contaba Wittfogel. Por eso, calificamos el modelo de la gran hidráulica moderna centralista como el despotismo occidental: una sumisión al orden central, una ausencia de representatividad, una planificación agrícola a veces muy dura”. (Ruf, 2000).

de 480 000 hectáreas, ya cuenta con personal especializado aunque el *locus* de autoridad es local; en el caso de Nepal las asociaciones de río conjuntan típicamente de 5 000 a 8 000 hectáreas.

La capacidad de organizaciones autogestivas en las que los regantes mismos se gobiernan y realizan ellos mismos las tareas de operación contiene ciertas características y restricciones, es decir la organización no es el resultado automático de la existencia de obra hidráulica.

TABLA 2

I. LOS LÍMITES DE LA AUTOGESTIÓN REFERIDOS A LA CAPACIDAD PARA CONSTRUIR OBRA HIDRÁULICA (Maass y Anderson, 1976 y Herrera y Lasso, 1994).

II. LOS LÍMITES DE LA AUTOGESTIÓN REFERIDOS A LA CAPACIDAD ADMINISTRATIVA, donde hemos priorizado los siguientes factores.

- 1.1 El tamaño del sistema involucrado y el número de usuarios. *Donde a mayor tamaño y número de usuarios mayor dificultad autogestiva.* (Vaidyanathan, 1985; Mabry, 1996 y Worster, 1985).
- 1.2 La capacidad de organización es mayor a nivel de comunidad que a nivel multicomunitario (Millon *et al.*, 1997).
- 2.1 El conocimiento previo de manejo y la tradicionalización del manejo (la tradición considerada como un conocimiento validado por experiencias empíricas previas). *Donde a mayor conocimiento y mayor tradicionalización mayor capacidad autogestiva.* (Millon, 1997; Milon *et al.*, 1997 y Maass y Anderson, 1976).
- 2.2 Inhibiciones a la organización autogestiva. *Donde a mayor intervención del Estado en la administración mayor inhibición del proceso de organización autogestivo.* (Ostrom, 1990, 1999 y Gelles, 1998).
- 3.1 La estructura de la organización para la administración: la existencia de niveles organizativos u organizaciones “anidadas”. (Ostrom, 1990; Yoder, 1994a y b y Pradhan, 1989).
- 3.2 En principio la organización y los niveles organizativos deben corresponder a las necesidades técnicas, debe haber una correspondencia entre la parte física (infraestructura hidráulica y/o curso natural del agua) y la social. *Donde a diseño organizativo más congruente mayor capacidad autogestiva.* (Palerm Viqueira *et al.*, 2002; Pimentel *et al.*, 2000; Yoder, 1994a y b y Pradhan, 1989).
- 3.3 La capacidad de organización es mayor cuando se comparte infraestructura hidráulica a la que se da mantenimiento por parte de la organización, y es menor cuando se comparte únicamente una fuente de agua. No obstante es una potente fuerza de movilización coyuntural y de organización para la defensa del agua frente a otros. (Fernea, 1997).
- 3.4 Pueden existir diferencias en la capacidad organizativa entre niveles organizativos. (Millon *et al.*, 1997).
- 3.5 La organización varía en el tiempo (*periodos del año de mayor requerimiento de agua, o años de sequía*) y en el espacio (*frecuentemente hay diferencias organizativas entre la cabeza y la cola de un sistema*). (Palerm Viqueira, 2001b).
- 3.6 La importancia crítica del riego en el patrón de cultivo como presión organizativa (factor ecológico). *Donde a mayor restricción en el acceso al agua para el patrón de cultivos imperante mayor organización.* (Wade, 1988, 1995).

Fuentes: Palerm Viqueira *et al.* (1999), además de los resultados empíricos en Martínez Saldaña y Palerm Viqueira (1997), Palerm Viqueira y Martínez Saldaña (2000), así como otros resultados no publicados del equipo de investigación Organización social y riego.

Interesa enfatizar que los regantes enfrentan dos grandes rubros de problemas en relación a su capacidad organizativa, uno que podríamos llamar interno referido a su propio aprendizaje organizativo y simultáneamente técnico para operar el sistema de riego; otro, externo, referido a la aceptación por el Estado (y de la sociedad en general) de su capacidad (véase 2.2 de la tabla 2), muchas veces de entrada mermada debido a la “invisibilidad” de las organizaciones autogestivas (véase 3.5 de la tabla 2).

Se añade a la problemática de aceptación sobre la capacidad organizativa, el escepticismo sobre la capacidad técnica de los regantes (IMT, 2002); no obstante que otros ingenieros en su momento señalaron que los regantes “son buenos para conservar” (Herrera y Lasso, 1994), o el ejemplo de Bali en el cual la propuesta de los técnicos hizo caer la producción y provocó la infestación por plagas antes controladas (Lansing 1991), así como la durabilidad misma de las instituciones de riego (Ostrom 1990, Rivera 1998).

SEGUNDA PARTE. PROBLEMÁTICAS EXTERNAS

El marco normativo en México

En México y seguramente en otras partes del mundo, se ha añadido como otro factor externo negativo la falta de continuidad y consistencia en las leyes de aguas (Lanz Cárdenas, 1982; Cuadros, 1999, Ley Federal de Aguas, 1972; Ley de Aguas Nacionales, 1992 y su reglamento, 1994).

En 1929 la legislación de aguas indica que es obligatorio para el aprovechamiento colectivo la conformación de una Asociación de Usuarios.

En 1934 y el reglamento de 1936 en corrientes, depósitos y aprovechamientos colectivos reglamentados es obligatoria la conformación de una Junta de Aguas de todos los usuarios —regantes o no; y la legislación también indica que se podrán conformar Sociedades de Usuarios para construir y administrar obra que a su vez podrán convertirse en Juntas de Aguas— pero no se mencionan las asociaciones de usuarios de la ley de 1929.

En la ley de 1972 se conserva la figura de Junta de Aguas como agente del ejecutivo para corrientes, depósitos y aprovechamientos colectivos reglamentados y se propone que los usuarios de las Juntas puedan conformar asociaciones de usuarios.

Además la ley de 1972 propone la formación de Unidades de Riego para el Desarrollo Rural [Urderal] para construir y administrar obra de riego, que deberán conformar Asociaciones de Usuarios; además se implementa un operativo por el cual toda la pequeña obra de riego queda sujeta a ser considerada Urderal y recibir la capacitación e instrucciones de reglamentación de la Secretaría de Recursos Hidráulicos [SRH] —pero no se mencionan las Sociedades de Usua-

rios. En pequeñas obras comunitarias ejidales o en los ejidos que reciben agua de sistemas multicomunitarios ello significó sustituir al comisariado ejidal y a la Asamblea de ejidatarios irrigantes (*sic*) que debían elegir un juez de aguas, por la figura de Asociación de la Urderal con su presidente, secretario y tesorero.

En 1992 se indica la formación de Asociaciones de Usuarios con carácter de obligatoria, y desaparece la de Urderales; así mismo desaparece la figura de Juntas de Aguas, aunque se mantiene la capacidad del Ejecutivo Federal de reglamentar aunque sin determinar quién va a ejecutar el reglamento. La desaparición de las Juntas de Aguas también implica que no existe una institución que conjunte a distintos sectores usuarios (las Asociaciones de Usuarios deben conformarse por tipo de uso), excepto los consejos de cuenca de carácter consultivo, y se indica que para cualquier cuenca podrá haber hasta 6 vocales representantes de usuarios, y por lo menos uno por cada uso.

Los usuarios de pequeño riego han transitado entonces de juntas de aguas a unidades de riego a asociaciones de usuarios, sin que estas tres categorías sean isomórficas. Para dar un ejemplo, y no la única posibilidad de sobrevivencias de leyes anteriores; a nivel de ejido dicen tener una unidad de riego (pero siguen eligiendo a su juez de aguas) y a nivel del sistema multicomunitario mantienen algo que llaman la junta de aguas y que debe transitar hacia una Asociación Civil con su título de concesión.

En la práctica la ley de 1972 sobre Urderales parece haber como efecto principal bautizar a las pequeñas obras de riego, o a las “obras de riego” no-distritos de riego, como unidades de riego: el país quedó dividido entre superficie regada por Unidades y superficie regada en Distritos de Riego.

En el caso de los distritos de riego las leyes, decretos, acuerdos y reglamentos, incluyendo la Ley de Riegos de 1946 abogaban por la entrega de los distritos o la organización de los usuarios por secciones de los distritos —hasta la Ley Federal de Aguas de 1972 en que se señala que es competencia del Estado administrar los distritos de riego (Lanz Cárdenas, 1982). De hecho hay un grupo de distritos que se entrega a los usuarios (*DOF*, 1941-1951), así como canales o partes de distritos en que hubo Juntas o Asociaciones de Usuarios. Una parte de los distritos entregados se vuelven a recoger (*DOF*, 1953-1960) y hay Juntas y jueces de agua en distritos que se suprimen por decreto (caso La Laguna: *DOF*, 1962), y hay Juntas que de hecho desaparecen al incorporarse o crearse un nuevo distrito sin nueva obra hidráulica (caso distrito estado de Morelos: *DOF*, 1953)².

² Una exploración en curso sobre reglamentos en el AHA (Archivo Histórico del Agua) nos permite afirmar que el proceso no es excepcional, los siguientes distritos han contado con reglamentos de diversas fechas en los que alguna organización de regantes administra todo o parte del distrito: los Distritos de Riego 02, 04, 04, 07, 09, 017, 034 y 038 con reglamentos de 1931, 1933; 1934, 1939, 1940, 1941, 1947, 1952.

Con la ley de 1992 y su reglamento de 1994 se hace obligatoria la entrega de distritos a los usuarios en la forma de asociaciones de usuarios por módulo y de S. de R. L. por conjunto de módulos de un distrito —pero no hay mención de las formas organizativas anteriores en los distritos, algunas de las cuales aparentemente persistieron, como la junta de aguas del Distrito de Riego 01 (Vázquez, 1987).

Los “apoyos” organizativos al pequeño riego y la ausencia de reconocimiento de capacidades

La problemática de la capacitación organizativa y técnica de los nuevos regantes fue enfrentada en su momento por los beneficiarios del reparto agrario y las instituciones del Estado a cargo; igualmente en el caso de nuevos regantes por la labor de ampliación de la frontera agrícola, que pasó de un estimado de 2 millones de hectáreas antes de la Revolución y 1 millón de hectáreas después de la Revolución (Tamayo, 1958, pp. 67 y 82), a una cifra en torno a los 6 millones de hectáreas. Destaca para el caso de pequeño riego la labor de la SAG (Fuentes *et al.*, 1976) y la labor de la SRH a través de las Urderales (SRH, 1974).

Falta ahora reconocer que los regantes han construido, en muchos casos, organizaciones eficaces que se basan en la participación de todos los regantes en el gobierno y en la operación del sistema, e incluso para la defensa del agua. Falta distinguir entre regantes organizados y capaces de autoadministrarse con falta de adecuación a un marco jurídico en constante cambio.

No obstante la asesoría técnica y la canalización de fondos de inversión al pequeño riego sigue siendo motivo de preocupación de las instituciones del Estado, una propuesta que se ha empezado a implementar es la formación de S. de R. L. (Sociedades de Responsabilidad Limitada) juntando varias “unidades de riego”, es decir de usuarios de sistemas de riego contiguos, pero no necesariamente relacionados en su fuente de agua o en su infraestructura con el propósito de que contraten especialistas y facilitar al gobierno su ubicación. Se pretende que las organizaciones de regantes se adecuen para recibir capacitación técnica y a facilitar el control del Estado, y no para administrar y operar sistemas de riego e intervenir en la gestión del agua por cuenca o por acuífero (véase 3.2 de la tabla 2).

Otros problemas, competencia por el agua entre usos

La legislación vigente apunta a una individualización del derecho de agua, la posibilidad de renta y venta de derechos de agua, y a la transferencia de agua entre sectores; y las políticas del Estado proponen adicionalmente la tecnificación del riego para “ahorrar” agua —que algunos han denominado ahorros de agua en papel (Seckler, 1996 y Escolero, 2002) y apoyar ultimadamente la transferencia “ordenada” de agua del sector agrícola al urbano-industrial; estas políticas son

motivo de debate. La venta de derechos de agua fuera del sistema, afecta al conjunto del sistema (discusión que se presenta en Nuevo México, Rivera, 1998); la renta y venta de derechos de agua por pequeños agricultores afectados por la situación de sequía y paralelamente la concentración en manos de un pequeño grupo de empresarios agrícolas tendrá consecuencias a muy largo plazo (Contreras, 2001); las consecuencias de la tecnificación del riego en consumo energético (Collado comunicación personal); la sustentabilidad de los sistemas de riego al monetizarse los insumos (Sánchez, 2000); el impacto de la disminución de la percolación sobre el medio ambiente: el arbolado y en general el paisaje que soporta una diversidad ecológica de plantas y animales (Contreras, 1995 y Renault *et al.*, 2001); las dudas sobre el mercado como la opción de gestión de recursos comunes (Ostrom, 1990).

Pero además hay otras problemáticas que enfrentan los regantes organizados y que carecen de un marco normativo adecuado, por ejemplo: la creciente contaminación del agua, ámbito en el cual los regantes carecen de la capacidad de exigir agua limpia o de exigir una compensación por el deterioro de la calidad de agua; así como la transferencia no compensada de agua al interior del sector agrícola o entre sectores provocada por una creciente competencia por el agua con otros usuarios de riego ubicados agua arriba y principalmente con otros sectores usuarios.

En los dos casos el ámbito de acción necesaria es sobre la fuente de agua: el tramo de río o de cuenca, y encontramos que no existen formalmente instancias de gestión y negociación que reúnan a los interesados: los Consejos de Cuenca son demasiado vastos además de su carácter de “consultivos”, la CNA carece de los recursos y personal para vigilar cada tramo de río del país. Sin embargo en la ley de 1934 y la de 1972 la policía y vigilancia de tramos de corrientes se delegó en Juntas de Aguas, que reunían a todos los usuarios del tramo reglamentado y que tenían la autoridad de Agentes del Ejecutivo; con la ventaja adicional, como señala Ostrom (1990), de que la acción basada en la información proporcionada por un monitoreo continuo por los mismos usuarios es siempre mejor y más barata.

Como caso específico podemos mencionar el tipo de problemas que enfrenta Asurco (Asociación de usuarios del río Cuautla): la perforación de pozos para abastecer a la Cd. de Cuautla y para los viveros ha mermado el caudal de los manantiales; el drenaje de la Cd. de Cuautla y las aguas residuales de una tenería afectan la calidad del agua de riego; los piperos (camiones cisterna para agua potable) toman agua indiscriminadamente de los manantiales; los cultivadores de berro hacen obras para remansar el agua en el cauce de los arroyos; la apropiación por nuevos usuarios de achololes (aguas residuales de la agricultura). Estos problemas se les presentan como más graves que aquellos referidos a la distribución del agua y al mantenimiento de los sistemas, y mientras pueden tomar

acciones sobre la distribución y mantenimiento, su capacidad de acción y sobre todo de libertad de negociación y acuerdos sobre los problemas “externos” son más limitados (Palerm Viqueira *et al.*, 2002 y Ávalos, 2003).

No obstante encontramos casos en que las organizaciones de regantes de manera informal, o más propiamente no oficial, han logrado concertar acuerdos con otros usuarios por ejemplo: para limitar la contaminación, para hacer uso de infraestructura hidráulica perteneciente a otros usuarios, para acordar el uso de achololes, para incluir a “ladrones” del agua en las tareas de mantenimiento, para establecer con una asociación de berreros fechas de cierre de siembras del cultivo de berro en el lecho del río (Cirelli, 2000, Palerm *et al.*, 2002 y otros resultados no publicados del equipo de investigación Organización social y riego). Existe una necesidad de negociación en lo local y para cada caso específico (Bruns y Meinzen-Dick, 2000 y Hollinga 1960, p. 16).

En la propuesta mexicana de gestión por cuencas se señala la necesidad de participación, sin embargo en muchos casos lo que hace falta es permitir que las organizaciones de regantes participen y respetar sus decisiones y acuerdos. Repitiendo palabras de B. Boehm están organizados —y participan, pero no cómo quieren las instituciones gubernamentales.

CONCLUSIONES

La capacidad autogestiva para administrar pequeños y medianos sistemas de riego basados en un gobierno y operación por los propios regantes, así como la capacidad autogestiva de administrar grandes sistemas basados en un gobierno por los regantes y una operación por personal técnico contratado es en la teoría y la praxis una realidad. La evidencia también señala la capacidad de negociar y llegar a acuerdos con otros usuarios de riego o que tienen otros usos del agua.

Sin embargo las mismas leyes y políticas del Estado impiden el pleno desarrollo de las capacidades autogestivas de las organizaciones de regantes de tal manera que puedan coadyuvar a una gestión integral del agua.

REFERENCIAS

- Armillas, P., A. Palerm y E. Wolf, 1956, “A small irrigation system in the valley of Teotihuacan” *American Antiquity*, 21 (4), pp. 396-399.
- Ávalos, Claudio, 2003, *Avances de investigación sobre la Asociación de Usuarios del río Cuautla y sus negociaciones y acuerdos con otros usuarios del agua*, (ms.).
- Boelens, R. y G. Dávila (eds.), 1998, *Buscando la equidad, concepciones sobre justicia y equidad en el riego campesino*, Van Gorcum, Países Bajos.

- Bruns, B. y R. Meinzen-Dick (eds.), 2000, *Negotiating water rights*, Vistaar Publications, New Delhi.
- Cirelli, C., 2000, "Aguas negras, agricultura periurbana y organización de regantes", en Palerm Viqueira, J. y T. Martínez Saldaña (eds.), *Antología sobre pequeño riego*, vol. II: *Organizaciones autogestivas*, Colegio de Postgraduados/ Plaza y Valdés, México.
- Contreras Balderas, S., 1995 [1975], *Impacto ambiental de obras hidráulicas*, Dirección General del Plan Nacional Hidráulico, SRH. Infomes Técnicos, 129 pp.
- Contreras Rentería, R., 2001, *El costo social del rentismo de derechos de agua superficial y tierras de riego en la región lagunera*, Tesis Maestría Estudios del Desarrollo Rural, Colegio de Postgraduados.
- Cuadros Caldas, J., 1999 [1932], *Catecismo agrario [Ley del Patrimonio Parcelario Ejidal*, agosto 25, 1927, pp. 73-81; *Ley de dotaciones y restituciones de tierras y aguas*, marzo 21, 1929, pp. 82-106; *Reglamento del Patrimonio Ejidal*, marzo 4, 1926, pp. 208-221], CIESAS/ Registro Agrario Nacional, México.
- Childe, G., 1954 [1936], *Los orígenes de la civilización*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Childe, G., s/f [1942], *Qué sucedió en la historia*, Siglo Veinte, Buenos Aires, Argentina.
- (DOF) *Diario Oficial de la Federación*, 1941-1951. (Entrega distritos de riego).
- 18/08/1941 Acuerdo que autoriza la entrega del Distrito de Riego Llanos de Uruapan, Mich., a la Junta de Aguas del lugar.
- 02/04/1943 Acuerdo que ordena se organicen los beneficiados con las obras llevadas a cabo en el Distrito de Riego de la Magdalena y Ahualulco, Jal., y formen una Junta de Aguas.
- 13/07/1946 Acuerdo que dispone se entregue la administración del Distrito de Riego de Don Martín, a la Asociación de Regante del propio Distrito.
- 24/04/1947 Acuerdo por el cual se autoriza a la Secretaría de Agricultura y Ganadería, para que entregue a la Junta de Aguas de Tuxpan, Gro., las obras y administración del Distrito de Riego de la laguna del mismo nombre.
- 19/12/1947 Acuerdo que dispone se entregue el Distrito de Riego de Atoyac-Zahuapan, en Tlaxcala y Puebla, a las Juntas de Aguas del citado Distrito y de la Presa Acoztzala.
- 19/12/1947 Acuerdo que dispone se entregue el Distrito de Riego de Pabellón, Ags., a la Junta de Aguas del citado Distrito.
- 09/04/1948 Acuerdo que dispone se entregue el Distrito de Riego de Palestina, Coah., a la Junta de Aguas del mismo, para su administración, distribución de sus aguas y conservación de las obras.
- 28/06/1948 Acuerdo que dispone se entregue el Distrito de Riego de El Rodeo, Mor., a la Junta de Aguas del citado Distrito, para su administración.
- 13/12/1948 Acuerdo que dispone que la Secretaría de Agricultura y Ganadería entregue el Distrito de Riego en El Nogal, Coah., a la Junta de Aguas del mismo.

- 26/08/1949 Acuerdo que autoriza se entregue a los usuarios poseedores de las tierras beneficiadas con las obras hidráulicas de la Sección de Riego de la Laguna de Cajititla, Jal., el sistema hidráulico correspondiente, para que lo administren y conserven por conduct... jurisdicción del Distrito de Riego Bajo Río Lerma.
- 26/03/1951 Acuerdo que dispone se entregue el Distrito de Riego de Tijuana, B.C., a la Junta de Aguas del citado Distrito, para su administración.
(DOF) *Diario Oficial de la Federación*, 1953-1960 (Distritos “recogidos”).
- 25/08/1953 Acuerdo que dispone que el Comité Directivo integrado por representantes de la Secretaría de Recursos Hidráulicos y de Agricultura y Ganadería, reasumirá totalmente la administración y operación de Distrito de Riego número 4, llamado también Don Martín, e.
- 14/06/1955 Acuerdo que dispone que el Ejecutivo Federal reasumirá totalmente la administración y operación del Distrito de Riego de Palestina, Coah., por conducto del Comité Directivo que se integre con este objeto.
- 18/07/1960 Acuerdo que dispone que el Ejecutivo Federal, por conducto de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, resume en su totalidad la administración, operación y conservación del Distrito de Riego Atoyac-Zahuapan, sito entre Tlaxcala y Puebla, así como de la Pr.
(DOF) *Diario Oficial de la Federación*, 1953 (caso Distrito de Riego Morelos).
- 14/11/1953 Acuerdo que establece el Distrito Nacional de Riego del Estado de Morelos.
(DOF) *Diario Oficial de la Federación*, 1962 (caso Distrito de Riego La Laguna).
- 06/01/1962 Acuerdo por el que se determina que la Secretaría de Recursos Hidráulicos asumirá también las funciones que ahora están a cargo de las Juntas Locales y Jueces de Aguas del Distrito de Riego número 17 de la Región Lagunera.
- Escolero, O., 2002, “Un modelo de índices de extracción real (aquella que no se re-incorpora al acuífero) de agua de un dado acuífero bajo distintos sistemas de riego (menos/más tecnificados) con la misma cantidad del agua bombeada”, ponencia presentada en el *Encuentro Técnico Agua y Agricultura en México*, 1 de octubre, Programa Agua Medio Ambiente y Sociedad de El Colegio de México y la UNAM.
- Fernea, R., 1997 [1963], “El conflicto en la irrigación”, en Martínez Saldaña, T. y J. Palerm Viqueira (eds.), *Antología sobre pequeño riego*, Vol. I, Colegio de Postgraduados, México, pp. 170-180.
- Fuentes Flores, A., F. Martínez Saínos y B. Téllez Fuentes, 1976 [1967], “Capacitación de usuarios de pequeñas obras de irrigación”, ponencia de la Secretaría de Agricultura y Ganadería presentada en *Conferencia Internacional sobre Agua para la Paz [Water for Peace: Proceedings of the International Conference on Water for Peace*, Washington, D.C. 1967, 8 vols. Stock núm. 1-2; w29-5/v1-8, Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 20402, USA] reproducido en *Boletín Informativo* [posteriormente *Revista Ingeniería Agrícola*] de la Dirección General de Ingeniería Agrícola

- de la SAG (1968 o 1969) y reeditado en un compendio de los *Boletines Informativos/Revista, SAG*, (1976).
- Gayol, R., 1994 [1906], *Dos problemas de vital importancia para México, la colonización y el desarrollo de la irrigación*, Biblioteca del Agua, IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua)/ CIESAS (Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social).
- Gelles, P., 1998, "Lógicas culturales que compiten: modelos estatales e indígenas en conflicto", en Boelens, R. y G. Dávila (eds.), *Buscando la equidad, concepciones sobre justicia y equidad en el riego campesino*, Van Gorcum, Países Bajos, pp. 274-285.
- Glick, T., 1970, *Irrigation and Society in Medieval Valencia*, The Belknap Press of Harvard University Press.
- Herrera y Lasso, J., 1994 [1919], *Apuntes sobre irrigación, Notas sobre su organización económica en el extranjero y en el país*, Biblioteca del Agua, IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua)/ CIESAS (Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, México).
- Hollinga, F., 1960, *Local Administration of Water Control in a Number of European Countries*, International Institute for Land Reclamation and Improvement en colaboración con FAO.
- Hunt, R., 1997 [1988], "Sistemas de riego por canales: tamaño del sistema y estructura de la autoridad", en Martínez Saldaña, T. y J. Palerm Viqueira (eds.), *Antología sobre pequeño riego*, Vol. I, Colegio de Postgraduados, México, pp. 185-219.
- IMT, 2002, *International E-Mail Conference on Irrigation Management Transfer*, junio-octubre de 2001c, FAO Land and Water Digital Media Series, num. 17, FAO.
- Lansing, S., 1991, *Priests and programmers. Technologies of power in the engineered landscape of Bali* Princeton University Press, Princeton, Nueva Jersey.
- Lanz Cárdenas, José Trinidad, 1982, *Legislación de aguas en México. Estudio histórico-legislativo de 1521-1981*, IV tomos, Consejo Editorial del Gobierno del estado de Tabasco, México.
- Leach, E.R., 1976 [1954], *Los sistemas políticos de la alta Birmania*, Editorial Anagrama, Barcelona, España.
- "Ley de Aguas Nacionales", 1992, publicada en el *Diario Oficial de la Federación*, el 1 de diciembre 1992.
- "Ley Federal de Aguas", 1972, publicada en el *Diario Oficial de la Federación*, el 11 de enero de 1972.
- Maass, A. y R. Anderson, 1976, and the desert shall rejoice, *Conflict, Growth and Justice in Arid Environments*, The MIT Press, Cambridge, EEUU; traducción de la "Introducción", en Martínez Saldaña, T. y J. Palerm Viqueira (eds.), 1997, *Antología sobre pequeño riego*, Colegio de Postgraduados, México.
- Mabry, J.B. (ed.), 1996, *Canals and Communities. Small Scale Irrigation Systems*, University of Arizona Press, Tucson.
- Martínez Saldaña, T. y J. Palerm Viqueira (eds.), 1997, *Antología sobre pequeño riego*, Vol. I, Colegio de Postgraduados, México.

- Millon, R., 1957, "Irrigation systems in the valley of Teotihuacan", *American Antiquity*, 23, pp. 160-166.
- Millon, R., 1997 [1962], "Variaciones en la respuesta social a la práctica de la agricultura de riego", en Martínez Saldaña, T. y J. Palerm Viqueira (eds.), *Antología sobre pequeño riego*, Colegio de Postgraduados, México.
- Millon, R., C. Hall y M. Díaz, 1997 [1962], "El conflicto en el sistema de riego del Teotihuacán moderno", en Martínez Saldaña, T. y J. Palerm Viqueira (eds.), *Antología sobre pequeño riego*, Vol. I, Colegio de Postgraduados, México, pp. 71-121,
- Mitchell, W., 1975, "Irrigation and community in the central peruvian highlands", *American Anthropology*, 78, pp. 25-43.
- Ostrom, E., 1990, *Governing the commons: the evolution of institutions for collective action*, Cambridge University Press, New York, Cambridge [traducción al español]: *El gobierno de los bienes comunes: la evolución de las instituciones de acción colectiva*, FCE/ SEMARNAP, México.
- Ostrom, E., 1999, "Principios de diseño y amenazas a las organizaciones sostenibles que administran recursos comunes", ponencia presentada en *VI Conferencia Electrónica y Exposición Virtual en Internet. De cara a la globalización: Organizaciones Económicas Campesinas en América Latina y el Caribe*.
- Palacios, L., 1994 [1909], *El problema de la irrigación*, Biblioteca del Agua, IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua)/ CIESAS (Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, México.
- Palerm, A., 1992 [1954], "Distribución geográfica de los regadíos prehispánicos en el área central de Mesoamérica", en Palerm, Ángel y Eric Wolf, *Agricultura y Civilización en Mesoamérica*, Ediciones Gernika, México, pp. 31-66.
- Palerm Viqueira, J., 2001a, "Self Management of Irrigation Systems: a Typology. The Mexican Case", en *2nd Conference of the International Water History Association*, Bergen, Noruega, 10-12 de agosto.
- Palerm Viqueira, J., 2001b, "Organizational strategies in water shortage situations: Mexican self-administrated irrigation systems", *International Journal of Water*, 1 (3-4), junio, pp. 285-306.
- Palerm Viqueira, J. et al., 1999, "Organizaciones autogestivas para la administración de sistemas de riego", en *Taller Internacional Transiciones en Materia de Tenencia de la Tierra y Cambio Social. Instituciones, Organizaciones e Innovaciones en Torno a los Recursos Naturales, Tierra, Agua y Bosques*, 9-11 de marzo, organizado por CIESAS y IRD (Institut de Recherche pour le Développement) con sede en la Casa Chata, México.
- Palerm Viqueira, J. et al., 2002, *Informe técnico "Diagnóstico organizativo de la Asociación de Usuarios del río Cuautla (Morelos)"*, [núm. convenio CNA-GDUR-CP-05/2001].
- Palerm Viqueira, J. y T. Martínez Saldaña (eds.), *Antología sobre pequeño riego*, vol. II: *Organizaciones autogestivas*, Colegio de Postgraduados/ Plaza y Valdés, México.

- Pimentel Equihua, J.L. y J. Palerm Viqueira, 2000, "Diseño de organizaciones autogestivas para el riego: el caso de la asociación de usuarios del río Cuautla, Morelos", en Palacios Vélez, E. y E. Espinosa de León (eds.), *Memorias Congreso Internacional de Transferencia de Sistemas de Riego, Proceso de Transferencia y Gestión* (mesa 1), ANEI (Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación), México, pp. 147-156.
- Pradhan, P., 1989, *Patterns of Irrigation Organization in Nepal. A Comparative Study of 21 Farmer-Managed Irrigation Systems*, IIMI, Sri Lanka.
- Price, D., 1994, "Wittfogel's neglected hydraulic/hydroagricultural distinction", *Journal of Anthropological Research*, 50 (3), pp. 187-204.
- "Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales", 1994, publicada en el *Diario Oficial de la Federación*, el 12 enero 1994.
- Reisner, M., 1986, *Cadillac Desert*, Penguin Books, EEUU.
- Renault, D., M. Hemakumara y D. Molden, 2001, "Importance of water consumption by perennial vegetation in irrigated areas of the humid tropics: Evidence from Sri Lanka", *Agricultural Water Management*, 46, pp. 215-230. Reimpreso por IWMI.
- Rivera, J., 1998, *Acequia Culture. Water, Land and Community in the Southwest*, University of New Mexico, Albuquerque.
- Ruf, T., 2000, "Prefacio", en Palerm Viqueira, J. y T. Martínez Saldaña (eds.), *Antología sobre pequeño riego*, Vol. II: *Organizaciones autogestivas*, Colegio de Postgraduados/ Plaza y Valdés, México.
- Sahlins, M., 1977 [1974], *Economía de la edad de piedra*, Akal editor, Madrid, España.
- Sánchez, M.A., 2000, *El impacto de la modernización y el cambio tecnológico en la agricultura de riego: el uso intensivo de las aguas subterráneas en la cuenca del río Laja, Guanajuato*, Maestría Antropología Social, UIA.
- Seckler, D., 1996, *The New Era of Water Resources Management: From "Dry" to "Wet" Water Savings*, Research Report 1, International Irrigation Management Institute (IIMI), Colombo, Sri Lanka.
- SRH, Secretaría de Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Operación, Dirección General de Unidades de Riego para el Desarrollo Rural, 1974, *Material básico de capacitación. Centro de capacitación permanente, "Benito Juárez" El Carrizo, Sinaloa*, (Mecanuscrito).
- Tamayo, J., 1958, *El aprovechamiento del agua y del suelo en México*, SRH, México.
- Vaidyanathan, A., 1985, "Water Control Institutions and Agriculture: a Comparative Perspective", *Indian Economic Review*, 20 (1), pp. 25-83.
- Vaidyanathan, A., 1999, *Water Resource Management. Institutions and Irrigation Development in India*, Oxford University Press.
- Vázquez Medina, Antonio, 1987, "Operación y conservación del Distrito de Riego 001: Pabellón por una junta de aguas", en *Memorias III Congreso Nacional de Irrigación. Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación A.C.*, Los Mochis, Sinaloa, nov., pp. 345-354.

- Wade, R., 1988, *Village Republics: Economic Conditions for Collective Action in South India*, Cambridge, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney, Cambridge University Press.
- Wade, R., 1995, "The Ecological Basis of Irrigation Institutions: East and South Asia", *World Development*, 23 (12), pp. 2041-2049.
- Wittfogel, K., 1966 [1957], *Despotismo oriental*, [corresponde a la primera edición, la edición de 1963, en la que se basa la traducción al español, incorpora adiciones y correcciones], Ediciones Guadarrama, Madrid, España.
- Worster, D., 1985, *Rivers of Empire. Water, Aridity and the Growth of the American West*, Pantheon Books, Nueva York.
- Yoder, R., 1994a, *Locally Managed Irrigation Systems*, IIMI, Sri Lanka.
- Yoder, R., 1994b, *Organization and Management by Farmers in the Chhattis Mauja Irrigation System, Nepal*, IIMI, Sri Lanka.

DE LOS AUTORES

Manfred van Afferden

Cuenta con estudios de biología en la *Ruhr-Universität Bochum*, Alemania. Doctorado en biotecnología del medio ambiente de la *Rheinische-Friedrich-Wilhelms-Universität*, Bonn, Alemania. Nivel I del SNI. Desde 1998 labora en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Ha publicado tres libros, 24 artículos y capítulos de libros y 17 resúmenes en extenso. También cuenta en su haber con el desarrollo de seis patentes.

Coautor en este libro del artículo “El lago de Chapala: destino final del río Lerma”.

Javier Alcocer Durand

Es Profesor Titular “B” de tiempo completo de la FES-Iztacala, UNAM, en donde funge como jefe del Proyecto de Investigación en Limnología Tropical (PILT). Su producción científica asciende a 35 artículos en revistas internacionales, 14 artículos en memorias en extenso internacionales, dos capítulos de libros internacionales, un libro internacional y tres libros nacionales. Ha formado 16 licenciados, seis maestros y un doctor. Es nivel I del SNI y nivel “D” del PRIDE. Actualmente preside la Asociación Mexicana de Limnología, A.C. y es vicepresidente de la International Society of Salt Lake Research. Es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias, de la Comisión Dictaminadora del Centro de Geociencias de la CIC, del Comité de Evaluación de Geociencias y Medio Ambiente del Conacyt y de la Red del Agua de la AMC. Ha recibido diversos reconocimientos como la Cátedra Alexander I. Oparin, el Reconocimiento al Mérito Académico Iztacala, la Medalla Gabino Barreda por sus estudios de maestría en Ciencias del Mar y de doctorado en Ciencias. Su campo de especialidad es la limnología tropical.

Además de participar en la coordinación de este libro es coautor de dos artículos: “Problemática del agua de la Cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala” y “Desecación de los lagos cráter del Valle de Santiago, Guanajuato”.

María Aurora Armienta Hernández

Es originaria de Culiacán, Sinaloa. Ingeniera química, con maestría en ciencias químicas (química analítica). En 1992 obtuvo con mención honorífica el doctorado en geofísica (aguas subterráneas) en la UNAM. Actualmente es Investigadora Titular “B” del Instituto de Geofísica. Ha desarrollado investigaciones en contaminación de acuíferos por elementos tóxicos en diversas regiones de México. Ha publicado 47 artículos en revistas arbitradas internacionales. En marzo de 2003, obtuvo el reconocimiento Juana Ramírez de Asbaje de la UNAM por su desempeño académico sobresaliente. Es nivel II del SNI. Fue presidenta del Instituto Nacional de Geoquímica (1998-2000), y delegada de la Association for Women Geoscientists (1993-1997).

Coautora en este libro del artículo “Metales y metaloides. Estudio de caso: contaminación por arsénico en el agua subterránea de Zimapán, Hidalgo; problemática ambiental y enfoque metodológico”.

Felipe Ignacio Arreguín Cortés

Es subdirector general técnico de la Comisión Nacional del Agua y profesor de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. En el SNI tiene el nivel II y sus publicaciones nacionales e internacionales llegan ya a 150. Ha recibido varios premios: el Enzo Levi 1996, a la Investigación y a la Docencia en Hidráulica, al Mejor Libro de Ingeniería del Colegio de Ingenieros Civiles de México 2001-2002 y al Mejor Artículo Teórico de la *American Society of Civil Engineers*, en 2003.

Coautor en este libro del artículo “El agua en México. Una visión institucional”.

Claudio Ávalos Gutiérrez

Es egresado de Ingeniería de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM; maestro en ciencias por la Universidad Autónoma Chapingo. Doctorado en ciencias en desarrollo rural por el Colegio de Postgraduados. Profesor Investigador de tiempo completo en la Universidad Autónoma Chapingo.

Coautor en este libro del artículo “Capacidad autogestiva para la administración de sistemas de riego: la teoría y problemáticas externas”.

Rubén Barocio Ramírez

Ingeniero civil egresado de la UNAM con maestría en administración de empresas por el Tecnológico de Monterrey y maestría en ingeniería civil y ambiental en Cambridge. Tiene 40 años de experiencia en planeación, diseño, construcción, supervisión, administración y operación de proyectos de ingeniería civil, ambiental y multidisciplinarios en México y otros países es miembro titular de la Academia de Ingeniería de México; miembro emérito del Colegio de Ingenieros Civiles de México y de diversas asociaciones profesionales. En la actualidad consultor independiente.

Coautor en este libro del artículo “La participación privada en los servicios de agua y saneamiento en México”.

Daniel Basurto González

Egresado de la Universidad Anáhuac con Mención honorífica en 1983. Diplomado por la Universidad Autónoma Metropolitana y la Profepa. Coordinador y profesor del Diplomado en Derecho Ambiental de la UP. Miembro del Claustro de Profesores de los Estudios de Posgrado de la Escuela Libre de Derecho; presidente de la Comisión de Ecología de la Concamin; ex presidente de la Comisión Nacional de Ecología de la Coparmex; subcoordinador de la Comisión de Derecho Ambiental de la Barra Mexicana de Abogados; ex miembro CCPC del TLCAN, del Acuerdo Paralelo en Materia Ambiental del TLC 1999-2002; miembro del Consejo Consultivo Nacional (CCN), del Acuerdo Paralelo en Materia Ambiental del TLC; consejero del Consejo Consultivo Nacional para el Desarrollo Sustentable; presidente de la Comisión de Ecología de la Camecic; asesor en materia de asuntos medioambientales de la Comisión Jurídica de la Concamin; miembro de la Comisión de Conieco, de la ANIQ, de la ANADE, de la Canacindra, de AMCHAM; socio fundador y responsable de la práctica ambiental de Basurto, Santillana y Arguijo, S.C. y Lexcorp Abogados; miembro del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental; autor constante de artículos en materia de medio ambiente en revistas y publicaciones especializadas.

Coautor en este libro del artículo “El marco jurídico del agua en México”.

Mario Alfonso Cantú Suárez

Es economista egresado de la Universidad Autónoma de Nuevo León, maestro en economía por la Universidad de Pennsylvania, y cuenta con créditos doctorales en economía y finanzas públicas. Ha sido catedrático de la Universidad

Iberoamericana y del Instituto Nacional de Administración Pública y desde 1998 es presidente del Instituto de Economistas Egresados de Instituciones de Educación Superior del Estado de Nuevo León. En el ámbito laboral, colaboró en CIEMEX-WEFA, Wharton Econometric Forecasting Associates, y en el servicio público ha ocupado importantes cargos en la Oficina de la Presidencia de la República, Liconsa, STPS, y en la SHCP. También se desempeñó como subdirector general de Administración del Agua en la Comisión Nacional de Agua. Actualmente se desempeña como administrador general de la Auditoría Fiscal Federal del Servicio de Administración Tributaria.

Coautor en este libro del artículo “Administración de derechos de agua. De regularización a eje de la gestión de los recursos hídricos”.

Antonio Cardona Benavides

Es ingeniero geólogo (Universidad Autónoma de SLP) y con maestría en ciencias en hidrología subterránea (Universidad Autónoma de Nuevo León). Es candidato a doctor en aguas subterráneas por la UNAM (posgrado en ciencias de la tierra). Su experiencia profesional la ha desarrollado como consultor privado y como profesor investigador en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, cuenta con numerosas publicaciones en revistas indexadas y con capítulos en varios libros. Su correo electrónico es acardona@uaslp.mx.

Coautor en este libro del artículo “Inducción de agua termal profunda a zonas someras: Aguascalientes, México”.

Rafael Bernardo Carmona Paredes

Egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México, recibió el título de físico en 1978, el grado de maestro en ingeniería (control) en 1983 y el de doctor en ingeniería mecánica en 1992, con mención honorífica. Ha participado en proyectos de investigación dedicados al diseño y operación hidráulicos de conducciones de agua a presión. Por sus trabajos de investigación ha recibido varios premios.

Coautor en este libro del artículo “Manejo internacional de agua en la frontera norte. El caso del río Colorado y la zona Tijuana-Mexicali-San Luis (TMSL)”.

Joel Carrillo Rivera

Es ingeniero geólogo (Instituto Politécnico Nacional), con diplomado en hidrogeología y maestría en hidrogeología del University College de la Gran Bretaña. Es doctor en filosofía por la Universidad de Londres, Gran Bretaña en hidrogeo-

logía. Su experiencia profesional la ha desarrollado en el gobierno del estado de Victoria, Australia, en la Comisión Federal de Electricidad, México, y actualmente como investigador de la UNAM en los institutos de Geofísica, Geología y Geografía. Es consultor del Conacyt, miembro del SNI y presidente del Capítulo Mexicano, Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Su correo electrónico es joeljcr@igiris.igeograf.unam.mx.

Coautor en este libro del artículo “Inducción de agua termal profunda a zonas someras: Aguascalientes, México”.

Gustavo Carvajal Isunza

Socio del despacho de abogados Solórzano, Carvajal, González y Pérez-Correa, S.C., fundado en 1995, en el que encabeza la práctica de derecho ambiental y participa en la de derecho internacional. Es profesor de derecho ambiental y de derecho administrativo a nivel de licenciatura y maestría en el ITAM. Ha sido también profesor de sistemas jurídicos contemporáneos en la Universidad Iberoamericana, de derecho de la integración económica en la UNAM y de derecho ambiental en la Universidad Panamericana. Es director asociado del Centro de Políticas Públicas para el Desarrollo Sustentable, A.C. (CEDES) en donde realiza principalmente proyectos relacionados con la reducción de gases efecto invernadero. Fue electo por la Asamblea Legislativa del D.F. como integrante del Consejo de Gobierno de la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal para el periodo 2001-2004. Conferencista y articulista en revistas especializadas sobre temas de desarrollo sustentable publicadas en México, Estados Unidos, Canadá y España. Es licenciado en derecho por la UNAM y maestro en políticas públicas por la Universidad de Harvard.

Coautor en este libro del artículo “El marco jurídico del agua en México”.

José Esteban Castro Mussupappa

Es investigador principal en la Escuela de Geografía y Medio Ambiente de la Universidad de Oxford. También es investigador asociado en el Centro de Estudios Mexicanos, el Centro de Investigación sobre el Agua, y el Centro de Desarrollo Internacional (Queen Elizabeth House) en la misma universidad. Ha cursado estudios de sociología y psicología (Universidad de Buenos Aires, 1988), maestría en ciencias sociales (Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, México, 1992), y doctorado en ciencia política (Universidad de Oxford, 1998). Estudia las relaciones entre control y gobernabilidad de recursos naturales, especialmente el agua, conflicto social, y ciudadanía. Su lista de publicaciones y actividades académicas puede consultarse en: <http://users.ox.ac.uk/~jecastro/>

Coautor en este libro del artículo “Ciudadanía y gobernabilidad en la cuenca del río Bravo-Grande”.

Enrique Cifuentes García

Es director del Programa del Salud Ambiental. Profesor y coordinador del posgrado en salud ambiental del Instituto Nacional de Salud en Cuernavaca, México. Es doctor y maestro en epidemiología y ciencias de la población por la Universidad de Higiene y Medicina Tropical de Londres. Posee además una maestría en salud pública de la Universidad de Nottingham Inglaterra y de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Coautor en este libro de dos artículos: “El agua en el Valle de México” y “El reúso intencional y no intencional del agua en el Valle de Tula”.

Ramón Domínguez Mora

Es doctor en ingeniería hidráulica graduado en 1990, en la UNAM. Es investigador titular “B” en el Instituto de Ingeniería. Imparte cursos desde 1969 en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Ha elaborado más de 100 informes de investigaciones realizadas para dependencias como la Comisión Nacional del Agua (CNA), la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Gobierno del Distrito Federal. Elaboró 2 capítulos del *Manual de Hidráulica Urbana*, 11 del *Manual de Obras Civiles* de la CFE y 5 informes de la serie azul del Instituto de Ingeniería. Ha publicado también más de 50 artículos *in extenso* en congresos así como 20 artículos en revistas nacionales y 15 en revistas de circulación internacional.

Coautor en este libro del artículo “El agua en el Valle de México”.

Óscar Arnoldo Escolero Fuentes

Es investigador titular del Instituto de Geología de la UNAM. Trabajó durante más de 22 años en la Comisión Nacional del Agua, donde ocupó el cargo de subgerente de aguas subterráneas. Su línea de investigación principal es la evaluación y manejo de los recursos hidráulicos. En los últimos diez años, ha sido profesor en el posgrado en ciencias de la tierra.

Además de participar en la coordinación de este libro, es coautor de dos artículos: “Problemática del agua de la Cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala” y “Desecación de los lagos cráter del Valle de Santiago, Guanajuato”.

Óscar Arturo Fuentes Mariles

Originario de la Ciudad de México, realizó sus estudios de ingeniería civil en la Facultad de Ingeniería de la UNAM y posteriormente la maestría y el doctorado en la División de Estudios de Posgrado de la misma facultad. Desde 1973 ha colaborado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, siendo subdirector de hidráulica e ingeniería ambiental de 1987 a 1995. Actualmente es investigador titular en este Instituto y del Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Coautor en este libro del artículo “La problemática del agua en Tabasco: inundaciones y su control”.

Héctor Manuel Garduño Velasco

Es ingeniero civil y maestro en ingeniería hidráulica de la UNAM. Fue fundador y director durante siete años del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Como subdirector general de administración del agua de la CNA, de 1993 a 1997, fue responsable del diseño e implantación del sistema de administración de derechos de agua. Actualmente forma parte del grupo central del Groundwater Management Advisory Team del Banco Mundial y trabaja como consultor internacional de la FAO. En esos cargos ha brindado asesoría a los gobiernos de diversos países en América Latina, incluyendo México, además de África y de Asia. Es miembro de la Asociación Mexicana de Hidráulica, la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, el Colegio de Ingenieros Civiles de México y la International Water Resources Association. Ha publicado diversos artículos y libros sobre gestión de recursos hídricos.

Coautor en este libro del artículo “Administración de derechos de agua. De regularización a eje de la gestión de los recursos hídricos”.

Jesús Gracia Sánchez

Originario de la Ciudad de México, realizó sus estudios de ingeniería civil en la Facultad de Ingeniería de la UNAM y posteriormente la maestría y el doctorado, ambas en hidráulica, en la División de Estudios de Posgrado de la misma facultad. Desde 1973 colabora como investigador en la sección de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM y como profesor en la DEPEFI.

Coautor en este libro de dos artículos: “La problemática del agua en Tabasco: inundaciones y su control” y “Manejo internacional de agua en la frontera norte. El caso del río Colorado y la zona Tijuana-Mexicali-San Luis (TMSL)”.

Anne Margaret Hansen

Posee licenciatura en química; maestría y doctorado en ciencias del mar con especialidad en oceanografía química de la Universidad Nacional Autónoma de México. Es nivel I del SNI. Desde 1990 labora en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Sus ponencias y publicaciones llegan ya a 48; tiene 11 capítulos y 2 libros y también ha desarrollado una patente.

Coautora en este libro del artículo “El lago de Chapala: destino final del río Lerma”.

Thomas Hergt

Es maestro en ciencias geológicas de Universidad Técnica Berlín (Alemania). Su desarrollo profesional (en el área de agua subterránea) lo ha realizado en la iniciativa privada y en la Universidad Nacional Autónoma de México. Ha publicado investigaciones en trabajos sobre hidráulica subterránea, en geología aplicada al agua subterránea y en el manejo de programas computacionales aplicados.

Coautor en este libro del artículo “Inducción de agua termal profunda a zonas someras: Aguascalientes, México”.

Blanca Elena Jiménez Cisneros

Doctora en tratamiento y reúso de agua e investigadora titular del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Autora de más de 220 artículos en revistas y libros, así como del libro *La contaminación ambiental en México: causas, tecnologías y efectos* de la editorial Limusa. Posee 4 patentes. Ha participado en más de 120 proyectos de investigación para el gobierno, el sector privado y fundaciones académicas. Es editora de varias revistas entre las que destacan *Water Research*, *Water Science and Technology* and *Sludges and Residuals Technology*. Entre otros premios ha recibido el Ciba de Innovación Tecnológica en Ecología 1993, el de Investigación Tecnológica de 1997 de la Academia Mexicana de Ciencias y The Royal Order of the Polar Star del gobierno de Suecia. Actualmente funge como asesor del International Hydrological Programme de la UNESCO. Pertenece al SNI y a la Academia Mexicana de Ciencias.

Además de participar como editora de este libro, es coautora de dos artículos: “El agua en el Valle de México” y “El reúso intencional y no intencional del agua en el Valle de Tula”.

Karina Kloster Favini

Es maestra en ciencias sociales de la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO-México), actualmente cursa el doctorado en ciencias políticas y sociales con orientación en sociología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Desde octubre del 2002 es becaria de investigación en la FLACSO y participa en los proyectos coordinados por la Dra. Ma. Luisa Torregrosa: *Private Involvement in Water and Sanitation Services* (Universidad de Oxford) y *Service Provision Governance in the Peri-urban Interface of Metropolitan Areas* realizado con el DPU de la University Collage London.

Coautora en este libro del artículo “Ciudadanía y gobernabilidad en la cuenca del río Bravo-Grande”.

Fernando Lara Guerrero

Ingeniero geofísico egresado de la UNAM en 1985, con maestría en hidrología subterránea por la Universidad del Estado de Colorado, Estados Unidos. Desde 1985 se ha dedicado a la práctica de la hidrogeología en dependencias del sector público. Actualmente, es responsable del área de Exploración y Monitoreo Geohidrológico, en la Comisión Nacional del Agua.

Coautor en este libro del artículo “Contaminación de acuíferos con hidrocarburos: causas, efectos, riesgos asociados y medidas de prevención”.

Juan Manuel Lesser Illiades

Ingeniero geólogo egresado de la UNAM en 1970, con cursos de posgrado en el NMIMT de Socorro, Nuevo México. Cuenta con más de 30 años de experiencia como consultor privado en las áreas de geohidrología y contaminación de suelos y acuíferos. Coordinador y profesor de cursos y diplomados internacionales. Fue el primer mexicano certificado por la Association of Ground Water Scientist and Engineers en 1996.

Coautor en este libro del artículo “Contaminación de acuíferos con hidrocarburos: causas, efectos, riesgos asociados y medidas de prevención”.

Luis Ernesto Marín Stillman

Es investigador titular del Instituto de Geofísica de la UNAM. Ha llevado a cabo estudios sobre la dinámica y contaminación del agua subterránea en la Península de Yucatán y regiones del centro de México. Realizó sus estudios de doctorado en la Universidad del Norte de Illinois. Es miembro del Sistema Nacional

de Investigadores, de la Academia Mexicana de Ciencias y de la Academia de Ingeniería.

Además de participar como editor de este libro es coautor de dos artículos: “Problemática del agua de la Cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala” y “Hidrogeología de la Península de Yucatán”.

Poliopetro F. Martínez Austria

Es ingeniero civil egresado del Instituto Politécnico Nacional, y obtuvo los grados de maestría y doctorado en ingeniería hidráulica en la Universidad Nacional Autónoma de México. Ha desarrollado la mayor parte de su labor profesional como investigador y docente, en la UNAM, como profesor de tiempo completo hasta 1987 y de asignatura desde entonces a la fecha. En el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ha ocupado diversos cargos, y en el IPN y otras instituciones académicas ha sido profesor de asignatura, director de tesis y conferencista. Ha fungido como consultor nacional e internacional. Actualmente se desempeña como jefe de la Unidad de Asuntos Fronterizos de la Comisión Nacional del Agua. Es autor de 110 artículos publicados en congresos y revistas nacionales e internacionales, así como de libros, patentes y programas de computación. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, de la Academia de Ingeniería, de la Academia Mexicana de Ciencias, y de la International Association for Hydraulic Research, entre otras; se ha hecho acreedor a diversos reconocimientos entre los que destaca el Premio Nacional Enzo Levi 2000 a la investigación y docencia en hidráulica.

Coautor en este libro del artículo “El agua en México. Una visión institucional”.

Marisa Mazari Hiriart

Bióloga, con maestría en hidrobiología aplicada y doctorado en ciencias ambientales e ingeniería. Ha trabajado sobre aspectos de calidad del agua en relación con microorganismos y compuestos orgánicos en la Cuenca de México, cuenta con diversas publicaciones técnicas sobre el tema. Actualmente es investigadora titular A del Departamento de Ecología de la Biodiversidad en el Instituto de Ecología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Coautora en este libro del artículo “El agua en el Valle de México”.

Renán Méndez Ramos

Ingeniero geólogo egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México y con estudios de diplomado en desarrollo directivo y gerencial en el Instituto Tecnológico de Monterrey. Ha impartido cátedras en las Fa-

cultades de Ingeniería y Ciencias Antropológicas de la Universidad Autónoma de Yucatán. Desde 1989 ha desempeñado diversos cargos en la CNA, lo que le ha permitido realizar actividades de planeación, saneamiento, modelación de acuíferos, asesor en geohidrología y perforación de pozos.

Coautor en este libro del artículo “Hidrogeología de la Península de Yucatán”.

Dante Jaime Morán Zenteno

Investigador titular del Instituto de Geología y profesor de la Facultad de Ingeniería. Ha realizado investigaciones sobre la evolución geológica de México, en especial sobre el origen de las rocas magmáticas de la región sur de nuestro país. Como resultado de estas investigaciones ha publicado numerosos artículos científicos y participado en la publicación de varios libros sobre el tema. Es miembro del Sistema Nacional Investigadores, la Academia Mexicana de Ciencias y la Academia de Ingeniería. Es coordinador de Geociencias de la Academia Mexicana de Ciencias.

En este libro participó como coordinador y entusiasta promotor.

Juan Manuel Nieto Calleja

Ingeniero geólogo egresado del IPN en 1976. Desde hace varios años se ha desempeñado como consultor del sector público en la Oficina de Restauración de Acuíferos del Departamento de Geohidrología, Gerencia de Ingeniería Civil, de la Comisión Federal de Electricidad. Ha participado en una gran cantidad de estudios, solicitados por el sector público, sobre la manera de enfrentar los problemas que se derivan de la contaminación de acuíferos.

Coautor en este libro del artículo “Contaminación de acuíferos con hidrocarburos: causas, efectos, riesgos asociados y medidas de prevención”.

Julia Guadalupe Pacheco Ávila

Investigadora titular de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. Ha estudiado el acuífero de la Península de Yucatán desde el punto de vista hidrogeoquímico y bacteriológico e imparte cátedras en las licenciaturas de ingeniería civil, de ingeniería física y en la maestría en ingeniería ambiental. Participa en procesos de evaluación de proyectos e informes de investigación, de ponencias en congresos y de programas educativos del área de ingeniería.

Coautora en este libro del artículo “Hidrogeología de la Península de Yucatán”.

Jacinta Palerm Viqueira

Profesora investigadora, del Colegio de Postgraduados en estudios del desarrollo rural. Su línea y equipo de investigación tratan el tema Organización Social y Riego. Página web: http://www.geocities.com/jacinta_palerm. Fue coeditora de *Antología sobre pequeño riego*, vols. I, II y III.

Coautora en este libro del artículo “Capacidad autogestiva para la administración de sistemas de riego: la teoría y problemáticas externas”.

José Luis Pimentel Equihua

Ingeniero agrónomo por la Universidad de Michoacán, maestro en ciencias en desarrollo rural por el Colegio de Postgraduados. Es estudiante del doctorado en la Universidad de Córdoba España e investigador del Colegio de Postgraduados al lado de Jacinta Palerm Viqueira y otros destacados académicos en estudios campesinos.

Coautor en este libro del artículo “Capacidad autogestiva para la administración de sistemas de riego: la teoría y problemáticas externas”.

María Rivas

Licenciada en antropóloga social por la Escuela Nacional de Antropología e Historia, maestra en ciencias en desarrollo rural por el Colegio de Postgraduados, estudiante del doctorado en el Colegio de Postgraduados con el proyecto “Manejo de agua de lluvia y suelo en la Mixteca Alta, jollas y maíces de cajete”. Profesora investigadora de tiempo completo en la Universidad Autónoma Chapin-go. Experiencia en docencia e investigación en etnobotánica y organización social para el pequeño riego. Sus correos electrónicos son mariauach@yahoo.com y marydesierto@hotmail.com

Coautora en este libro del artículo “Capacidad autogestiva para la administración de sistemas de riego: la teoría y problemáticas externas”.

Ramiro Rodríguez Castillo

Originario de Córdoba, Ver. Es físico, egresado de la Facultad de Ciencias de la UNAM, maestría en ciencias (geofísica) de la misma Facultad y con doctorado en geología de la Universidad de Bucarest, Rumania. Se desempeña como investigador titular “B” del Instituto de Geofísica de la UNAM. Es nivel 2 del SNI y secretario de la Comisión de Geofísica de la Academia de Ingeniería.

Coautor en este libro es coautor del artículo “Metales y metaloides. Estudio de caso: contaminación por arsénico en el agua subterránea de Zimapán, Hidalgo; problemática ambiental y enfoque metodológico”.

Jorge Carlos Saavedra Shimidzu

Ingeniero civil con maestría en investigación de operaciones. Labora en el Grupo Mexicano de Desarrollo, S.A., donde es director de la División de Agua, desde hace 10 años. Fue subsecretario de Infraestructura Hidráulica del Estado de México (1992-1998), gerente de Promoción a la Participación Privada (1990-1992) y de Uso Eficiente del Agua (1989-1990) en la Comisión Nacional del Agua, además laboró como coordinador de Tecnología Hidráulica Urbano Industrial en el Instituto Mexicano de Tecnología (1986-1989). Ha sido profesor de asignatura en la UNAM durante 18 años.

Coautor en este libro del artículo “La participación privada en los servicios de agua y saneamiento en México”.

Susana Saval Bohórquez

Ingeniera bioquímica egresada del IPN en 1974, con maestría y doctorado en biotecnología por la UNAM en 1985 y 1992, respectivamente. Desde 1993 en el Instituto de Ingeniería de la UNAM ha realizado un importante número de estudios sobre contaminación y remediación de suelos y acuíferos para las diferentes entidades paraestatales que manejan productos del petróleo. Ha contribuido de manera importante en la definición de límites permisibles de contaminantes en suelo y agua subterránea.

Coautora en este libro del artículo “Contaminación de acuíferos con hidrocarburos: causas, efectos, riesgos asociados y medidas de prevención”.

Christina Siebe Grabach

Es ingeniera agrícola por la Universidad de Hohenheim, Alemania, donde también obtuvo el doctorado en 1994. Actualmente es investigadora del Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM. Realiza estudios sobre procesos de degradación y contaminación de suelos y desarrolla estrategias y metodologías para evaluar el estado actual de los edafocistemas de México y predecir su evolución en el tiempo. Entre sus proyectos de investigación figuran algunos relacionados con el impacto del riego con agua residual sobre los suelos del Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo.

Coautora en este libro del artículo “El reúso intencional y no intencional del agua en el Valle de Tula”.

María Isabel Studer Noguez

Es doctora en relaciones internacionales de la School of Advanced International Studies de la Universidad de John's Hopkins (Washington D.C.). Cursó la maestría en economía internacional y estudios canadienses en la misma universidad y la licenciatura en relaciones internacionales de El Colegio de México. Es profesora investigadora de la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO) y miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Ha sido profesora de tiempo completo de relaciones internacionales en el Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM) y en el Centro de Investigación y Docencia Económicas. También fue profesora visitante del Colorado College, becaria Fulbright y Galo Plaza Fellow del Diálogo Interamericano, así como directora general para América del Norte en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Es también columnista sobre asuntos internacionales de *El Universal*. La doctora Studer es autora del libro *Ford and the Global Strategies of Multinationals*, publicado por Routledge. Sus otras publicaciones abordan temas relacionados con el proceso de integración regional y las instituciones de América del Norte así como las relaciones internacionales de México-Canadá y México-Estados Unidos.

Coautora en este libro del artículo “Ciudadanía y gobernabilidad en la cuenca del río Bravo-Grande”.

María Luisa Torregrosa Armentia

Es doctora en ciencias sociales con especialidad en sociología de El Colegio de México, es profesora investigadora de la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO), miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Subcoordinadora de Participación Social del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, (IMTA) de 1990 a 1997. Ha diseñado y coordinado un conjunto de proyectos relacionados con las políticas de modernización para el sector agua, tanto en el ámbito urbano como rural, de los que ha publicado un conjunto de artículos y colaboraciones en libros, está en prensa el libro *Modernización del campo y crisis de las identidades sociales tradicionales en el campo mexicano*. Actualmente coordina el equipo mexicano del Proyecto de Private Involvement in Water and Sanitation Services, realizado con la Universidad de Oxford. Asimismo coordina al equipo de México para el proyecto Service Provision Governance in the Peri-urban Interface of Metropolitan Areas realizado con el DPU de la University Collage London.

Coautora en este libro de dos artículos: “Ciudadanía y gobernabilidad en la cuenca del río Bravo-Grande” y “Ciudadanía y gobernabilidad en México: el caso de la conflictividad y la participación social en torno a la gestión del agua”.

Venancio Trueba López

Ingeniero civil, con maestría y doctorado en ingeniería. Ha trabajado en construcción de presas y consultoría para proyectos de edificios, instalaciones industriales, presas, plantas de tratamiento de agua, sistemas de agua potable y alcantarillado, y comportamiento sísmico y dinámico de edificios, tuberías, túneles y maquinaria. Ha sido investigador en el Instituto de Investigaciones Eléctricas y en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Fue profesor de asignatura en la DEPEI/UNAM y miembro del SNI. Desde 1997 se desempeña como coordinador del Programa de Modernización del Manejo del Agua (Promma, BIRF 4050-ME) en la Comisión Nacional del Agua.

Coautor en este libro del artículo “El agua en México. Una visión institucional”.

El agua en México vista desde la academia
se terminó de imprimir en abril de 2004.

La tipografía y la producción
editorial estuvieron a cargo
de Literal, S. de R. L. MI.

bajo la coordinación de
Blanca Jiménez, Luis Marín
y Dante Morán de la UNAM.

Se tiraron 1 000 ejemplares
más sobrantes para reposición.

Este libro reúne en 18 artículos las reflexiones de más de 40 especialistas, tanto del sector académico como del gubernamental y privado, que abordan el problema del agua analizando sus variadas y complejas facetas, desde la perspectiva geográfica regional hasta los temas más específicos como los relacionados con la distribución, disponibilidad, escasez y calidad del agua, la sobreexplotación de los acuíferos, el reúso no intencional de aguas negras, el marco jurídico y administrativo y la participación ciudadana.

La Academia Mexicana de Ciencias, preocupada por la trascendencia de estos problemas y la necesidad de enfrentarlos de manera rigurosa, convocó a este grupo de expertos con el fin de que la discusión multidisciplinaria de estos temas se traduzca en las iniciativas y los consensos necesarios que permitan emprender acciones que no deben posponerse más.