

# Innovación tecnológica, **cultura y gestión** \_\_\_\_\_del agua

Nuevos retos del agua en el Valle de México

S E R I E  
**ciencias  
sociales**  
TERCERA DÉCADA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Dr. José Lema Labadie  
*Rector General*

Mtro. Luis Javier Melgoza Valdivia  
*Secretario General*

UNIDAD AZCAPOTZALCO

Dr. Adrián de Garay Sánchez  
*Rector*

Dra. Sylvie Jeanne Turpin Marion  
*Secretaria*

UNIDAD CUAJIMALPA

Dra. Magdalena Fresán Orozco  
*Rectora*

Dr. Óscar Comas Rodríguez  
*Secretario*

UNIDAD IZTAPALAPA

Dr. Óscar Monroy Hermosillo  
*Rector*

M. en C. Roberto Torres-Orozco Bermeo  
*Secretario*

UNIDAD XOCHIMILCO

Dr. Cuauhtémoc V. Pérez Llamas  
*Rector*

Lic. Hilda Rosario Dávila Ibáñez  
*Secretaria*

# Innovación tecnológica, cultura y gestión del agua

Nuevos retos del agua en el Valle de México

Delia Montero Contreras  
Eugenio Gómez Reyes  
Graciela Carrillo González  
Lilia Rodríguez Tapia  
*Coordinadores*



**CONOCER  
PARA DECIDIR**

EN APOYO A LA  
INVESTIGACIÓN  
ACADÉMICA

CONSEJO  
EDITORIAL



Casa abierta al tiempo



MÉXICO • 2009

Esta investigación, arbitrada por pares académicos,  
se privilegia con el aval de la institución coeditora.

La H. CÁMARA DE DIPUTADOS, LX LEGISLATURA,  
participa en la coedición de esta obra  
al incorporarla a su serie CONOCER PARA DECIDIR

Coeditores de la presente edición  
H. CÁMARA DE DIPUTADOS, LX LEGISLATURA  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA  
MIGUEL ÁNGEL PORRÚA, librero-editor

La investigación académica de esta obra fue realizada gracias al  
apoyo de la cátedra Raúl Anguiano de Recursos Naturales  
y Desarrollo Sustentable (Semarnat)

Primera edición, mayo del año 2009

© 2009  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

© 2009  
Por características tipográficas y de diseño editorial  
MIGUEL ÁNGEL PORRÚA, librero-editor

Derechos reservados conforme a la ley  
ISBN 978-607-401-079-4

Queda prohibida la reproducción parcial o total, directa o indirecta del  
contenido de la presente obra, sin contar previamente con la autori-  
zación expresa y por escrito de los editores, en términos de lo así  
previsto por la Ley Federal del Derecho de Autor y, en su caso, por  
los tratados internacionales aplicables.

IMPRESO EN MÉXICO



PRINTED IN MEXICO

[www.maporrúa.com.mx](http://www.maporrúa.com.mx)

Amargura 4, San Ángel, Álvaro Obregón, 01000 México, D.F.

## *Introducción*

EL APROVECHAMIENTO de los recursos naturales tiene un impacto directo en el bienestar de las sociedades. Éste no sólo se asocia con el tipo de recurso que se explota, sino con la forma en la que se efectúa tal aprovechamiento, la manera en la que se distribuyen socialmente los beneficios de su utilización, así como la disponibilidad de conocimientos y recursos para su preservación equilibrada.

Entre el conjunto de recursos naturales renovables, el caso del agua es sin duda un claro ejemplo de las complejas y profundas interacciones que se establecen entre el entorno biofísico y los ámbitos social, económico e institucional que dan forma y determinan los niveles de bienestar de la población en el corto plazo, pero además constituye un elemento estratégico para garantizar la viabilidad de la sociedad y los modelos de vida de las generaciones futuras en el largo plazo.

Por su naturaleza, implicaciones sociales y urgencia para ser atendido, uno de los temas prioritarios de la agenda del desarrollo en el presente siglo a escala mundial es el del agua. Organismos internacionales, Estados, universidades, centros de investigación, empresas y grupos de la sociedad civil coinciden en la necesidad de buscar e instrumentar tecnologías innovadoras y en poner en marcha una nueva cultura de aprovechamiento y gestión en su manejo.

El tema es fundamental en nuestro país, principalmente porque la disponibilidad, el consumo y los usos del agua son muy desiguales en el territorio nacional. El reto actual de las estrategias que se pongan en marcha en el sector hidráulico mexicano, debe

ser el de garantizar la disponibilidad del agua en un contexto de crecientes variaciones en los ciclos meteorológicos e hidrológicos, el de considerar los cambios en la dinámica demográfica nacional, el de replantear la notable ineficiencia de los actuales patrones sociales de aprovechamiento, así como vincular el conocimiento científico con las interacciones entre el sistema social y el ecológico, de tal forma que conlleven a diversas opciones para mejorar el desarrollo de la política hidráulica y las formas de aprovechamiento de este recurso. De ahí que el reto sea encontrar formas innovadoras para garantizar el abastecimiento social, la conservación y llevar a cabo prácticas de aprovechamiento y de gestión precautorias.

La búsqueda de alternativas para promover un mejor desempeño del sector hidráulico, requiere de la concurrencia interdisciplinaria como un reflejo fiel de la complejidad asociada con las múltiples dimensiones del agua para promover su disponibilidad, distribución, disposición y correspondiente tratamiento. De ninguna manera es un asunto público sencillo de atender. En primer lugar, por las restricciones ecológicas, científicas, técnicas, institucionales, culturales, presupuestarias, políticas y sociales que deben considerarse en el diseño de las propuestas de solución. En segundo, porque existen diferentes perspectivas de solución e interpretaciones de la manera en la que debe atenderse la solución a un problema público de la envergadura que tiene garantizar la disponibilidad de agua en cantidades suficientes y con una calidad inmejorable para los ciudadanos, con el menor costo de oportunidad social y ecológico que sea posible.

Desde luego, lo anterior implica abordar el tema con una visión de conjunto que comprenda la aplicación de tecnologías innovadoras y adaptadas a las necesidades regionales de nuestro país con un sólido fundamento científico, así como la promoción de un enfoque alternativo de gestión y de una nueva cultura del agua que establezca responsabilidades entre los distintos usuarios. Es decir, se trata de que los conocimientos generados en el área científica y tecnológica sean complementarios y orientados a lograr una gestión del recurso donde se contemple la nueva gobernanza

con instituciones que ya participan en la extracción, saneamiento y distribución u otras que se requieran en su instrumentación, y desde luego una nueva cultura donde estén implicados no solamente el sector público y el privado, sino la sociedad en su conjunto.

Al igual que en el resto del país, el Valle de México también está inmerso en una difícil situación respecto de la solución de los problemas relacionados con la disponibilidad, uso y reutilización del agua, ya que geográficamente se ubica en una zona de difícil acceso al recurso, con una densidad de población importante y que conjuntamente con las actividades económicas que aquí se desarrollan han propiciado una sobrecarga a las fuentes de abastecimiento, problemas de contaminación y de costos ecológicos ocultos bajo un modelo de abastecimiento desequilibrado y desigual. Situación que desde luego compromete a la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) a la búsqueda de soluciones desde una perspectiva interdisciplinaria, como parte de su compromiso con la sociedad. Una parte de ese esfuerzo es el que se presenta en este libro en el que se abordan las perspectivas tecnológica, social, económica y cultural de la problemática del agua en el Valle de México.

La tradicional política de gestión del agua basada en una creciente extracción para atender las necesidades de la sociedad, enfrenta sus límites ante el hecho de que existe un déficit absoluto del recurso en la Cuenca del Valle de México y los crecientes costos de oportunidad social involucrados, por lo que el aumento de la extracción de las fuentes locales y la importación de flujos externos a la cuenca enfrenta diversos obstáculos como los financieros y ecológicos. Ante ello es urgente la puesta en marcha de una nueva política hídrica en la región, que fomente el desarrollo sustentable y enfatice en la explotación de los aprovechamientos internos de la cuenca, la recuperación de volúmenes perdidos de agua por fugas para aumentar la oferta, mitigar la sobreexplotación del acuífero, así como la sustitución de agua potable por agua tratada en el riego y la industria mediante el tratamiento avanzado de las aguas residuales.

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) requiere urgentemente de una reflexión respecto de los problemas relacio-

nados con la gestión y aprovechamiento del agua. No sólo debido a los desequilibrios y rezagos sociales de corto plazo, sino también porque se compromete su viabilidad de largo plazo. Esta es una región en la que el modelo de organización político y social del país propició una concentración poblacional y productiva creciente con un consumo hídrico superior a la capacidad de las fuentes locales de abastecimiento. Lo anterior ha implicado, a diferencia del resto de las regiones hidráulicas administrativas del país, una mayor presión en el consumo proveniente de los hogares.

No se puede pasar por alto la importancia económica que tiene esta región para el país en su conjunto. Pues su aportación al producto interno bruto (PIB) nacional es una de las más importantes, cuenta con una alta densidad de empleos y es donde se han ido instrumentando programas de gestión del agua que han propiciado una nueva gobernanza a partir de las diversas formas de participación del sector público y privado.

Ante la importancia que tiene el agua para garantizar la viabilidad futura de la sociedad y su riqueza cultural en la Cuenca del Valle de México, el doctor José Lema Labadie, Rector General de la Universidad Autónoma Metropolitana convocó a un diálogo interdisciplinario para abordar el diagnóstico de la problemática del agua en la ZMCM, con la participación de especialistas de la propia institución provenientes de diferentes campos del conocimiento en las Ciencias Básicas e Ingeniería, las Ciencias Biológicas y de la Salud y las Ciencias Sociales y Humanidades. El objetivo ha sido construir un espacio de análisis interdisciplinario para la elaboración de alternativas con la participación de tomadores de decisiones en los sectores hidráulico federal y locales, además de integrantes de la sociedad civil. Por lo que esta obra tiene la fortuna de reunir trabajos de especialistas del agua para tratar el tema a partir de tres ejes transversales fundamentales: la tecnología, la gestión, así como la cultura y la sustentabilidad.

En la elaboración de esta obra no sólo ha sido importante el compromiso y decidido respaldo de las autoridades de la UAM. Debe destacarse la disposición y entusiasmo de su comunidad académica para participar en la construcción de un lenguaje co-



mún que ha facilitado la interacción multidisciplinaria en largas sesiones de trabajo. Igual de importante es el soporte que ha brindado para la edición de esta obra la *Cátedra Raúl Anguiano de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable* que desarrollan conjuntamente el Instituto Nacional de Ecología y la Universidad Autónoma Metropolitana.

La reflexión en torno de la búsqueda de dispositivos sociales destinados a resolver los problemas del abastecimiento de agua, su calidad, su distribución, su aprovechamiento y su correspondiente tratamiento, tiene afortunadamente una diversidad de enfoques y de explicaciones, que lejos de constituir un obstáculo, enriquecen la posibilidad de diseñar alternativas atinadas y con mayor probabilidad de efectividad. La diversidad es el común denominador de los materiales que conforman esta obra. Sin embargo, existe un reconocimiento al papel fundamental que desempeña el gobierno en la construcción de soluciones, a la necesidad de refundar el compromiso y la corresponsabilidad entre los usuarios de los servicios de agua potable para promover un modelo de aprovechamiento más eficiente, y a la importancia de la aplicación de tecnologías adecuadas tendientes a mejorar la situación hidráulica del Valle de México, lo que puede traducirse en programas de manejo de cuenca desde una visión integral, modelos de gestión adecuados y la generación de una nueva cultura en el usuario que comprenda la dimensión real de la importancia del agua.

La primera parte de esta obra analiza temas y actores fundamentales dentro de la gestión del recurso como es la política en materia hídrica, los organismos operadores, el consumo agrícola y las concesiones, donde se presentan algunos resultados y se hacen propuestas para un mejor manejo del recurso.

En el trabajo de Jorge Morales y Lilia Rodríguez se argumenta la necesidad de aplicar una nueva política hídrica en la región que se fundamente en la administración de la demanda de agua más que la oferta, política que cobra importancia al analizar cada uso del agua, toda vez que el doméstico es el que más se ha incrementado ya que actualmente es del 73% del suministro total

dentro del abastecimiento público de agua a la Cuenca del Valle de México (CVM), mientras que el agrícola es del 20%, el industrial del 6 y 1% que se reporta para otros usos. Para ello, los autores describen el manejo que se ha seguido en la gestión del agua desde la década de 1950, el cual se ha caracterizado por aumentos sistemáticos de la oferta ante una demanda también creciente del recurso, cuyo resultado visible es una sobreexplotación de los acuíferos de la CVM y una creciente importación de agua del Sistema Cutzamala y de la cuenca del Río Lerma para satisfacer dicha demanda, esto hace que la cuenca se enfrente a un modelo no sustentable del agua, mismo que políticamente puede tener justificación, pero que ha impedido tomar decisiones que permitan un uso racional del recurso, por lo que en este trabajo se sugieren políticas específicas para cada tipo de usuario así como algunas líneas de trabajo que permiten mejor su manejo frente a una posible crisis del agua.

En el trabajo de Julio Goicoechea, que se basa en información proporcionada por el *Primer Censo de Captación, Tratamiento y Suministro de Agua*, se analiza la situación económica de los organismos operadores del agua potable en el Distrito Federal (uno) y Estado de México (125), y destaca la importancia de evaluar el desempeño económico de éstos, como fase previa a la discusión relativa a la conveniencia de modificar las tarifas de agua potable. Se argumenta que tanto el racionamiento del recurso así como el establecimiento de precios con base en el costo marginal de operación y la respuesta de los consumidores ante el precio, requiere de antemano conocer el estado económico de dichos organismos operadores.

El tercer trabajo de esta primera parte es el de Graciela Carrillo e Isabel Quintas que abordan el consumo de agua en la agricultura en la ZMVM, sector que en la actualidad es prácticamente inexistente en las estadísticas oficiales debido a que los pozos destinados a este uso se han transferido al sector urbano e industrial, algunas veces de manera legal y otras clandestinamente. A pesar de ello, en la información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) en 1999,

se confirma la existencia de agricultura tanto de riego como de temporal en el Distrito Federal, donde la práctica de la agricultura de temporal se lleva a cabo principalmente en las delegaciones de Cuajimalpa, Álvaro Obregón y Magdalena Contreras, en donde se ubica la mayor producción y comercialización de nopal a escala nacional.

En el capítulo de Delia Montero se analiza cómo la desregulación gradual en el sector del agua a partir de la década de 1980 ha permitido la participación del capital privado ya sea nacional o internacional en la distribución, saneamiento y factoraje del agua, así como la expansión y mayor incursión de los grandes consorcios internacionales en el sector a partir de diferentes fusiones y adquisiciones con empresas locales. Específicamente resalta la importancia del sistema de concesiones, el cual se concentra prácticamente en dos empresas transnacionales, lo que pone en riesgo un recurso vital y estratégico para cualquier sociedad. La autora plantea que la participación del capital privado no resolverá los problemas de falta de agua y su distribución, ya que éste se enfoca principalmente a conglomerados importantes y con infraestructuras existentes, es decir, a las zonas más rentables, por lo que afirma en definitiva, que las actividades de este sector deben ser una tarea exclusiva del Estado a la cual no debe renunciar.

Finalmente, en el último trabajo de esta sección Graciela Carrillo y Roberto Constantino abordan y discuten las implicaciones que tiene para el diseño de las estrategias de gestión del agua el origen de la escasez de este recurso. Se parte de la consideración que la política de gestión hídrica y sus instrumentos no puede ser igual si el origen de la escasez del agua se debe a una condición física, que aquella situación en la que la escasez se origina por fallas de coordinación y de gobierno. Toda aproximación al diseño de instrumentos de gestión y al de la arquitectura institucional debe partir de la identificación de los elementos que obstaculizan un abasto suficiente y equilibrado socialmente.

La segunda parte de esta obra está dedicada al estudio de la sustentabilidad y la cultura del agua, temas que sin duda se relacionan con el bienestar social desde diversas perspectivas. La sustentabilidad es esencial, ya que considera la disponibilidad de

los recursos naturales como elemento fundamental para garantizar la calidad de vida de la población, también toma en cuenta los aspectos que determinan la oferta de este recurso y los relaciona con aquellos que incorporan la demanda con temas relacionados como estilos de vida, pautas de aprovechamiento y los modelos de gestión, que son determinantes en el comportamiento del acervo del agua así como del resto de los recursos naturales.

La aproximación hacia la sustentabilidad desde los usos del agua implica por una parte, entender y asumir que existe un problema de escasez relativa vinculado a la heterogénea distribución de las fuentes naturales así como a las grandes y graves diferencias en el tipo de infraestructura desarrollada para su distribución, y que tienen como contexto un modelo inadecuado de gestión del agua. Por otro lado, la sustentabilidad no sólo tiene un componente ecológico o de oferta, también es importante en términos de los impactos sociales relacionados con la capacidad para atender las necesidades sociales y la mecánica de los impactos provocados por patrones de aprovechamiento poco precavidos.

Después de varias décadas de reflexión en torno a los asuntos ambientales que consideran problemas específicos del agua e intercambios que ocurren en el ámbito social, se ha generado un proceso paulatino de mejora de las capacidades científicas y de acumulación de conocimientos, lo que hoy nos lleva a saber que es inviable sostener la organización social y los modelos de apropiación de espacios urbanos y rurales, si no se considera el papel fundamental que tiene en ellos la disponibilidad de agua y un esquema de gestión que responda a las necesidades de la sociedad y del sistema natural.

Es por eso que en esta segunda parte se presentan trabajos, que proponen la incorporación de una serie de elementos que involucran a diversos actores en la construcción de una nueva cultura del agua, que nos explican la experiencia en programas de manejo de agua que se han dado desde el enfoque de planeación y manejo integral de cuencas así como el saneamiento de ríos, y la recreación, en forma sintética, de una historia de las políticas hidráulicas fincadas exclusivamente en la edificación de túneles para evitar futuras inundaciones en la ciudad.

El primer trabajo de esta sección es el de Ernestina Zapiain y Alfonso Álvarez, quienes proponen una metodología que incorpora los hábitos, costumbres, principios, comportamientos y la historia de los individuos, ellos consideran las percepciones subjetivas que deben modificarse para producir un cambio en la conducta de los diversos agentes. Dicha metodología tiene como objetivo la creación de una nueva cultura del agua que quedaría integrada por cuatro factores: la comunicación, la identidad, la cultura y la acción, siendo esta última determinante en la cultura de relaciones, la gestión eficaz y el cambio.

En la misma tónica del trabajo anterior, el capítulo firmado por el Grupo de Economía Ecológica de México (GEEM) integrado por David Barkin y jóvenes del Programa Doctoral en Ciencias Económicas, propone la formulación de un modelo alternativo emergido desde la Economía Ecológica (EE) y la Nueva Cultura del Agua (NCA), donde describen los criterios metodológicos que consideran la valoración del líquido desde distintas perspectivas, los conflictos ecológicos distributivos y los principios de equidad, justicia social y responsabilidad ambiental para posteriormente, a partir de la problemática manifestada en el Valle de México, realizar un diagnóstico sobre la gestión pública del agua en la zona y finalmente presentar las premisas conceptuales de la propuesta para la gestión del agua, que incluye una tarifa que pretende la equidad.

Por su parte Pedro Moctezuma y Óscar Monroy presentan un trabajo que recupera la figura de la Comisión de Cuenca, como la instancia responsable en la toma de decisiones en relación con el manejo de una subcuenca, que en este caso se enfoca a los ríos Amecameca y La Compañía, a partir de un modelo de gestión integral que incorpora la planeación colaborativa formada por grupos promotores interinstitucionales con capacidad de convocatoria que desempeñan un papel activo en la gestión, desarrollando mecanismos capaces de integrar organizaciones y actores que se clasifican en términos de intereses, recursos, cultura, valores, poder y características estructurales.

En el trabajo que presentan Juan Manuel(†) y Martha Chávez, se discute una propuesta, que desde la visión de varios autores,

sugiere integrar la planeación del paisaje y el agua en el marco de la sustentabilidad para posteriormente hacer un análisis de los distintos modelos de gestión del agua y manejo de cuenca que se han dado en distintos contextos, y en este sentido exploran en la última parte del trabajo la posibilidad de transformar el Canal Nacional en el Distrito Federal (DF) en un corredor verde.

Finalmente, Jorge Legorreta aborda la historia hidráulica de la Cuenca de México a lo largo de cinco siglos; además interroga sobre las políticas hidráulicas del siglo xx que se han sustentado exclusivamente en la construcción de más túneles cuya finalidad ha sido evitar futuras inundaciones en la ciudad, y cuya decisión se ha fundamentado en limitadas discusiones de los poderes de la nación.

La tercera parte de este libro contempla un tema fundamental en materia hidráulica como es la innovación tecnológica para la sustentabilidad de agua; se plantea que la instrumentación de una política hídrica sustentable requiere de nuevas tecnologías no convencionales, las cuales afortunadamente, se han estado desarrollando en universidades y diversos centros de investigación. En el caso de la UAM, los desarrollos tecnológicos de vanguardia inciden en sistemas eficientes de detección de fugas no visibles en la red secundaria de agua potable, así como en el tratamiento de aguas residuales y de otros componentes que pueden remover las sustancias tóxicas del sistema hídrico.

En el trabajo de Eugenio Gómez-Reyes, Víctor Téllez y Rebeca Quiñonez, se describe un método para la detección de fugas no visibles en la red secundaria de agua potable a través del Sistema Interactivo de Redes de Agua (SIARDA), que se basa en la simulación numérica del flujo transitorio y en el monitoreo de la presión en la red de distribución, que comprende toda la información del catastro técnico del sistema de distribución de agua potable, así como las causas principales de la generación de fugas. Los casos de aplicación de esta tecnología indican que SIARDA promete ser una buena alternativa para reducir el tiempo y costo en la localización de fugas no visibles, contribuyendo de esta manera a la recuperación de volúmenes perdidos por fugas.

José Luis Nava, Edgar Butrón e Ignacio González presentan un estudio del proceso de incineración electroquímica de una solución que simula a un efluente o descarga generado por la industria textil que contiene el colorante azul índigo, empleando electrodos tridimensionales de diamante dopados con boro (BDD) a diferentes condiciones hidrodinámicas. Los resultados obtenidos con este tipo de tecnología contribuyen a la solución de problemas de contaminación que se genera en la industria textil en virtud de su eficiencia para el saneamiento de las aguas residuales y sus bajos costos financieros.

Por su parte, Fernando Rivera, Ignacio González y José Luis Nava, nos muestran la aplicación de un Reactor con Electrodo de Cilindro Rotatorio, que es una de las tecnologías más utilizadas para la remoción de metales al nivel de laboratorio para la extracción de cobre contenido en un enjuague generado por una industria de cromado de plásticos, particularmente de un enjuague de cobrizado. Se encontró que con este proceso electroquímico el agua tratada tiene la calidad para ser reutilizada en el mismo proceso de enjuague, lo que indica que el proceso de remoción de cobre por electrólisis de cobre es técnica y económicamente viable, para ser considerado como una alternativa para el tratamiento de los enjuagues generados por la industria galvanoplástica.

En el trabajo colectivo que encabeza Anne Bussy, se muestran los resultados de aplicar la tecnología de distribución química o de especiación que presentan los metales durante su diagénesis en los sedimentos, para determinar el potencial de toxicidad del medio acuoso. Esta tecnología se aplicó a los sedimentos del río Lerma, pero pueden ser trasladados a los depósitos de otros sedimentos, como por ejemplo de áreas de riego con agua residual sin tratamiento y a depósitos de basura, para determinar la toxicidad de las aguas infiltradas. Esta tecnología de tipo químico permite describir de manera experimental la distribución geoquímica de los metales en los sedimentos, así como su disposición para liberarse de estas asociaciones y por lo tanto convertirse en una fuente de contaminación tóxica, toda vez que la liberación de ciertas fracciones metálicas las hacen biodisponibles para ser asimiladas por los organismos.

En el trabajo colectivo encabezado por Edgar López, se aplica la tecnología de la simulación numérica del transporte de la concentración de contaminantes disueltos en los cuerpos de agua de la Cuenca Alta del Río Lerma, para valorar el patrón de distribución y destino de contaminantes tóxicos (metales) introducidos por descargas de origen doméstico, industrial y agrícola. Entre otros resultados se muestra que el pH más ácido, mayor conductividad y baja oxigenación se presenta en el río Lerma, que es el que conduce la mayor parte del agua residual industrial de la zona estudiada, mientras que en la presa Alzate es ligeramente alcalino.

Diana Pimentel, Sergio Revah, Rafael Campos, Óscar Monroy y Eduardo Vernon, en su trabajo presentan una tecnología de biorremediación para la remoción de metil *tert*-butil éter (MTBE) en acuíferos contaminados por derrames de gasolina, a través de un consorcio microbiano degradador de MTBE, mostrando una eficiencia de eliminación de MTBE por el consorcio microbiano de  $60.7 \pm 5.1\%$  en un ciclo de 288 horas. La tecnología aquí utilizada tiene un potencial de aplicación importante debido entre otras cosas a que es simple, las emulsiones pueden ser producidas en equipos de mayor escala, y los materiales utilizados en la emulsión múltiple  $W_1/O/W_2$ , pueden ser recuperados y reutilizados, disminuyendo los costos operacionales.

Finalmente, la cuarta parte de este libro comprende estudios de caso donde se ha llevado a cabo un manejo integral en algunos ríos y presas, que plantean la preservación del ciclo hidrológico a partir de una política hídrica basada en un manejo integral del agua encaminado a la sustentabilidad, que contemple estudios del agua con su naturaleza, con la interacción de los diferentes contaminantes, con las interacciones entre especies acuáticas vivientes, con los factores bióticos y abióticos que intervienen en el ciclo hidrológico (como la erosión de suelos), así como con los elementos de carácter social y económico que permiten sostener el ecosistema. Por lo que en esta sección se presentan resultados de investigaciones concernientes a la especiación que estudia los compuestos a nivel molecular y su influencia con la contaminación y a la calidad del agua, en donde se aborda la problemática



desde una óptica interdisciplinaria que permite proponer soluciones más sólidas, al estar sostenidas técnicamente y contemplar la economía y la sociedad.

En el primer trabajo de esta sección, Erasmo Flores, Juan Manuel Pomares, María Rita Valladares y Agustín Breña, describen la experiencia del manejo integral del agua durante tres años de trabajo en el río Tlalmanalco, donde se estudió la calidad del agua y sus variaciones a partir del curso del río. Los autores concluyen que la calidad del agua al inicio del río es buena pero que muy cerca empieza a contaminarse ya que se descargan aguas residuales a lo largo de su curso, así como tanto desechos industriales como los efectuados por nuevos asentamientos humanos. A pesar de ello, consideran que aún es tiempo de recuperar la calidad del agua, a partir de plantas de tratamiento, reusar el agua e infiltrarla, y proponen sentar las bases para una prueba de laboratorio donde se analice la calidad del agua con sistemas anaerobios, que no requieren inyección de aire lo que reduce sus costos, así como también contemplar variables ambientales que afectan a los microorganismos.

En el segundo trabajo presentado por Erasmo Flores, Juan Manuel Pomares, María Rita Valladares y Agustín Breña relacionado con el tema de la infiltración, los autores contemplan a parte de datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (Conagua), la necesidad de infiltrar una parte del agua tratada en zonas con aptitud de recarga y regresar la otra parte al río para mantener vivo su ecosistema y dar de esta forma un manejo integral al líquido.

El tercer trabajo presentado por María Rita Valladares, Erasmo Flores y Felipe López Sánchez, para el caso del Río Chico los Remedios, se trata de un estudio donde se tienen resultados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que determinan la calidad del agua del río, se observa que para el saneamiento del río y su conservación se tienen que manejar las variables sociales, trabajar con grupos ambientalistas, con las autoridades municipales, así como con el resto de la población y grupos aledaños, aunque también es importante considerar el factor económico ya que se

vincula con proyectos productivos que hacen uso de esa agua. Además presentan resultados que aclaran la preocupación de la población sobre la posible contaminación de los manantiales aledaños cercanos a lo que fue el tiradero a cielo abierto de Rincón Verde que es actualmente relleno sanitario.

Finalmente, en el trabajo colectivo encabezado por Icela Barceló, los autores presentan un estudio de la Cuenca Alta del Río Lerma y la presa José Antonio Alzate, donde se realiza un estudio de especiación del agua y los efectos adversos en la vida acuática. También se estudia una especie vegetal en particular, que permite mitigar el problema de erosión en la misma presa.

La presente obra contó siempre con todo el apoyo de la licenciada Claudia Ibáñez que labora actualmente en la Rectoría General de nuestra Universidad, a quien queremos agradecer ampliamente su mayor disponibilidad, apoyo y entusiasmo para la realización de este libro, su trabajo administrativo y sin ninguna reserva que en todo momento nos ha brindado en todas las tareas, ha sido un pilar importante para la culminación de esta obra.

Desde luego que este libro no estaría completo sin el reconocimiento del trabajo dedicado y puntual de la IBI Patricia Zavala Vargas, por su invaluable e insustituible labor que cuidadosamente hizo en todo momento para que esta obra llegue presentada de la mejor forma al público que nos honra con su lectura.

[Marzo 2009]

Primera parte

*Demanda, usos  
y gestión del agua*



JORGE A. MORALES NOVELO\*  
Y LILIA RODRÍGUEZ TAPIA\*

## *Política hídrica en la Zona Metropolitana del Valle de México y riesgos para suministrar agua al uso doméstico e industrial*

### INTRODUCCIÓN

LA ZONA METROPOLITANA DEL Valle de México<sup>1</sup> (ZMVM) es la región de mayor importancia económica, política y social del país. Su crecimiento ha llevado a concentrar hasta el 2005 una población de 19'239,910 habitantes en casi 7,854 km<sup>2</sup>, con una densidad de población de 2,450 personas por km<sup>2</sup>, que es la más alta de México, y que ubica a esta ciudad entre las de mayor densidad demográfica en el mundo. En esta zona también se presenta la mayor concentración industrial. Actualmente en ella se genera 32% del producto interno bruto manufacturero (PIBM) del país.

Los requerimientos de agua en una ciudad de estas dimensiones son de 2,922 hm<sup>3</sup> al año que explican una extracción *per cápita* media anual de 151.8 m<sup>3</sup>, equivalentes al suministro de 272 litros por habitante al día (l/hab/día), para cubrir este abastecimiento, los acuíferos de la ZMVM han sido sometidos a una sobreexplotación y esto hace necesaria la importación de agua de cuencas aledañas, como la del Lerma y la del Cutzamala.

El proceso de crecimiento de la ciudad ha ido acompañado de una política hídrica consistente en aumentar la oferta de agua

\* Profesores-investigadores del Área de Investigación Crecimiento Económico y Medio Ambiente, Departamento de Economía, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

Los autores agradecen la valiosa colaboración de la IBI Patricia Zavala Vargas en la organización de la información estadística.

<sup>1</sup> El Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) define a la ZMVM como la región constituida por 16 delegaciones del Distrito Federal (DF) y 60 municipios del Estado de México y de Hidalgo, principalmente.

como respuesta a los aumentos de su demanda, y ha dado como resultado la actual sobreexplotación de los cuerpos de agua en la Cuenca del Valle de México (CVM) y de las cuencas del Lerma y del Cutzamala. Este manejo ha sido políticamente conveniente, puesto que no genera conflictos entre los diversos usuarios, sin embargo, hoy se enfrenta a fuertes tensiones ante el hecho de que existe un déficit absoluto del recurso en la CVM y a que el aumento de la importación de otras cuencas tiene límites ecológicos y financieros, aunado a que los poseedores de los derechos del agua en las cuencas exportadoras defienden sus recursos como no se hacía en el pasado.

Frente a dicha problemática, parece necesario aplicar una nueva política hídrica en la región, que fomente y destaque la administración de la demanda del agua, más que la oferta. En este sentido, en el presente artículo se discute el papel que los diversos usos del agua desempeñan dentro de la demanda agregada del recurso, los usos doméstico y público urbano, englobados en lo que se denomina abastecimiento público; los usos industrial, comercial y de servicios, agrupados en lo que se conoce como industria autoabastecida, y los usos agrícola, acuacultura, pecuario, múltiples y otros, que comprenden el uso agropecuario.

El artículo se integra con tres apartados. En el primero se ubica geográficamente la ZMVM dentro de la CVM y se describe la forma en que la población ha aumentado y cómo la disponibilidad natural<sup>2</sup> de agua es insuficiente para cubrir la extracción total que realizan los diversos usuarios de la ZMVM, clasificados en los grupos de usuarios abastecimiento público e industria autoabastecida. El uso agropecuario se ubica fuera de la ZMVM y no es objeto de estudio en este artículo.

En el segundo apartado, se analizan los usos del agua dentro del área urbana, abastecimiento público e industria autoabastecida. Para cada tipo de usuario, se estudian sus requerimientos de agua de primer uso, sea autoabastecida o suministrada. Para el uso

<sup>2</sup> Volumen total de agua renovable superficial y subterránea que ocurre en forma natural en una región (Estadísticas del agua, 2006).

doméstico, primordial dentro del abastecimiento público, se analizan los problemas y límites para cubrir el suministro del agua potable y el ineficiente manejo que los hogares hacen de ésta. Para el caso de la industria manufacturera, el usuario más significativo dentro de la industria autoabastecida, se describe su elevada dependencia del autoabastecimiento y la jerarquía que tiene el suministro de agua potable. Asimismo, se sugieren vías para que aumente la eficiencia en el uso del agua y se abastezca más de agua de reuso.

En el tercer apartado, se analiza la importancia del uso de agua tratada como fuente potencial de abastecimiento, que puede representar una salida para no frenar el crecimiento de las actividades económicas en la ZMVM. El tipo de tratamiento del agua residual se destaca como elemento clave en el proceso de reuso, tanto para los grupos de usuarios abastecimiento público e industria autoabastecida como para el uso agropecuario fuera de la zona urbana. El elevado nivel de contaminación de los cuerpos de agua en los que se descargan actualmente las aguas residuales de la ZMVM obliga a que las descargas sean aguas tratadas, como lo exigen las normas de descargas impuestas por la autoridad ambiental, pero que en los hechos no se cumplen.

Por último, se presentan consideraciones finales que dan cuenta de la importancia de que los usuarios conozcan los límites que enfrenta el suministro de agua y asuman las políticas específicas para cada tipo de uso, y se sugieren ideas para mejorar el manejo que permita caminar sobre una senda diferente a la amenaza de estancamiento económico y crisis del agua en la ZMVM.

La gestión integrada de los recursos hídricos es la vía para resolver las restricciones de agua en la CVM. Es urgente diseñar y aplicar un esquema integral que contemple abastecimiento, drenaje, saneamiento, inundaciones y hundimientos diferenciales. Sin embargo, la actual forma de gestión se caracteriza más bien por administrar cada fase del agua de manera independiente, por lo que es indispensable una nueva política hídrica en la ZMVM y por lo tanto, en la CVM.

## POBLACIÓN Y DEMANDA DE AGUA EN LA CVM Y SU ÁREA METROPOLITANA

La CVM ocupa el área conocida como Región del Valle de México en donde se asienta la ZMVM. En este sentido, es claro que la presión demográfica y el crecimiento económico han conducido al uso intensivo del agua en la cuenca, de tal forma que a la fecha sus propios recursos hídricos son insuficientes para cubrir sus necesidades y se ha tenido que recurrir a la interacción con las cuencas aledañas para importar agua, de tal suerte que su sistema de abastecimiento de agua de primer uso es altamente complejo, tanto desde el punto de vista técnico y administrativo, como de funcionalidad. Estos problemas definen a la CVM como la más complejo del país, tanto por las características de su territorio como porque alberga el segundo asentamiento humano más grande del mundo.

La población de la ZMVM explica 96.84% de la población de la CVM, lo que deja claro que su comportamiento poblacional expresa prácticamente lo que ocurre con respecto a la extracción de agua en el área urbana de toda la cuenca.

### *Abastecimiento de agua en la mancha urbana de la CVM*

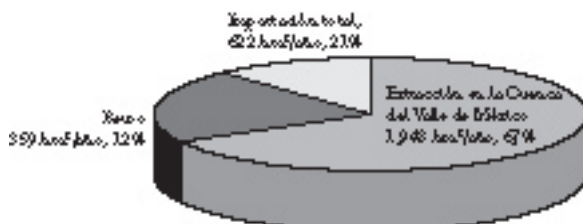
Los requerimientos de agua en la ZMVM se abastecen en primera instancia de los acuíferos de la CVM, sin embargo, esta fuente ha sido insuficiente debido al acelerado crecimiento urbano y poblacional del área, por ende, se ha recurrido al abastecimiento mediante las cuencas aledañas, así como en menor medida, al reuso del agua residual. La extracción total de agua en la CVM en 2004 alcanzó la cifra de 2,922 hm<sup>3</sup> en promedio al año; las fuentes de suministro se presentan en la gráfica 1.

La extracción de los cuerpos de agua de la misma cuenca hidrológica del Valle de México alcanzó, en 2004, un nivel de 1,943 hm<sup>3</sup> y representó dos terceras partes de su abastecimiento total (67%), el agua de reuso en la misma cuenca alcanzó un volumen de 359 hm<sup>3</sup>, lo que representa 12% de la extracción



total. Para abastecer de agua a la ZMVM, se extraen casi cuatro quintas partes (79%) de la cuenca, una quinta parte (21%) del agua proviene de cuencas aledañas, lo que equivale a la importación de agua en un volumen de 622 hm<sup>3</sup>.

GRÁFICA 1  
EXTRACCIÓN TOTAL PROMEDIO DE AGUA  
EN LA CVM POR FUENTE DE SUMINISTRO, 2004

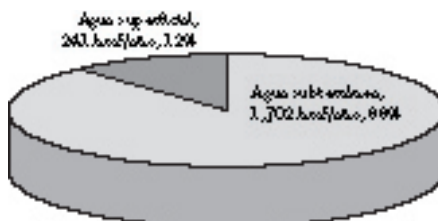


Fuente: *Compendio básico del agua 2004*, Gerencia Regional XIII, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Comisión Nacional del Agua, México.

### *Límite de la extracción de agua en la misma CVM*

La extracción en los cuerpos de agua de la CVM alcanza una cifra de 1,943 hm<sup>3</sup> en promedio al año, suma total de la extracción en los cuerpos de agua superficial y subterránea (gráfica 2).

GRÁFICA 2  
EXTRACCIÓN PROMEDIO DE AGUA DENTRO DE LA CVM, 2004



Fuente: *Compendio básico del agua 2004*, Gerencia Regional XIII, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Comisión Nacional del Agua, México.

De acuerdo con la gráfica 2, la fuente que abastece de forma central a los usuarios de la CVM son los cuerpos de agua subterráneos, que representan 88% de la extracción total que contrasta con la extracción en los cuerpos de agua superficiales, que sólo representan 12%. Los 1,702 hm<sup>3</sup> de agua subterránea que anualmente se extraen del acuífero del Valle de México rebasan el volumen que proporciona la recarga natural anual, que es de 751 hm<sup>3</sup>, esto muestra que los cuerpos de agua subterráneos de la cuenca están sobreexplotados en 951 hm<sup>3</sup> al año (véase cuadro siguiente).

#### SOBREEXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO DE LA CVM, 2004

<i>Origen</i>	<i>m<sup>3</sup>/s</i>	<i>hm<sup>3</sup>/año</i>
Recarga natural	23.8	751
Extracción de aguas subterráneas	53.9	1,702
Déficit (sobreexplotación)	30.1	951

Fuente: *Compendio básico del agua 2004*, Gerencia Regional XIII, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Comisión Nacional del Agua, México.

La sobreexplotación de los acuíferos del Valle de México indica que cada año se extrae más agua de la que es repuesta por la recarga natural, y esto se consigue reduciendo la reserva ancestral que se tiene en los acuíferos en un volumen igual a los 951 hm<sup>3</sup> al año. Esta es la razón por la que los acuíferos han disminuido su nivel de recarga a medida que continúa la extracción anual en los volúmenes antes señalados y a mayor profundidad cada año. Esta sobreexplotación además es causa del hundimiento del suelo en zonas urbanas al formarse en el subsuelo grandes cavernas que no soportan el peso de las construcciones ubicadas en la zona afectada.

Uno de los problemas más graves para el desempeño futuro de esta región es la sobreexplotación de los cuerpos subterráneos de agua. Hasta ahora la importación de agua y el reuso no han sido medidas suficientes para detener dicho proceso de sobreexplotación. La importación del recurso sólo cubre la quinta parte

de los requerimientos de toda la ZMVM, y proviene de las cuencas más cercanas, la del Lerma y la del Cutzamala. Para la conducción del agua, se construyeron dos grandes obras de infraestructura hidráulica; una es conocida como Sistema Cutzamala, que importa el recurso de cuerpos de agua superficial, y la otra es el Sistema Lerma, que importa agua subterránea. Este sistema también alimenta a la ciudad de Toluca en su recorrido hacia la Ciudad de México.

*Déficit absoluto de agua para cubrir el consumo de la población en la CVM*

La disponibilidad natural media es un indicador que considera únicamente el agua de primer uso, es decir, el agua de lluvia que se transforma en escurrimientos de agua superficial y la recarga de acuíferos. Se define por los volúmenes de agua superficial y subterránea existentes dentro de una demarcación geográfica, tal como una cuenca hidrológica. Dichos volúmenes se refieren al agua que el hombre puede utilizar a lo largo del tiempo para satisfacer sus necesidades hídricas. El valor de la disponibilidad natural media de agua por habitante<sup>3</sup> ( $\text{m}^3/\text{hab}/\text{año}$ ) determina la escasez o abundancia del recurso en cada cuenca. De acuerdo con el Índice de Falkenmark<sup>4</sup> una disponibilidad menor a  $1000 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$  denota escasez extrema y es el rango ubicado en el grado inferior de su clasificación.

Según la información de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), en el 2004 la CVM tuvo una disponibilidad natural media de agua de  $85.8 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$ , valor que representa la más baja disponibilidad de las cuencas del país. El valor de dicha disponibilidad, de acuerdo con el Índice de Falkenmark califica a la CVM con una escasez extrema de agua.

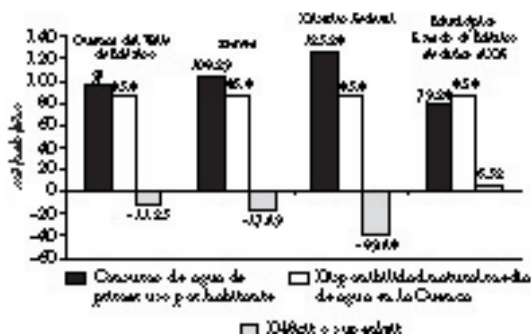
Contrastando la disponibilidad natural con el consumo de agua de primer uso por persona en la CVM, en la gráfica 3, se tiene

<sup>3</sup> La disponibilidad natural media per cápita se determina al considerar la disponibilidad natural media del agua en la cuenca o región definida entre la población asentada en la misma.

<sup>4</sup> El Índice de Falkenmark clasifica la disponibilidad de agua en categorías (Indicador de Falkenmark, WRI, 2000).

que, el volumen de agua que se consume por persona es de 97 m<sup>3</sup>/hab/año y que la disponibilidad es de 85.8 m<sup>3</sup>/hab/año, es claro que se rebasa la disponibilidad natural de agua en 11.25 m<sup>3</sup>/hab/año, que representa un 13% de déficit del recurso, que se completa con agua importada y con la sobreexplotación de los cuerpos de agua subterráneos.

GRÁFICA 3  
CONSUMO DE AGUA POR HABITANTE EN m<sup>3</sup>/HAB/AÑO



Nota: por no contar con la información, se supone la misma disponibilidad natural para todas las delimitaciones políticas.

Fuentes: XI y XII Censo general de población y vivienda, 1990 y 2000, II Censo de población y vivienda 2005, INEGI. Registro Público de Derechos de Agua (Repda), Conagua, 2005, *Compendio básico del agua 2004*, Gerencia Regional XIII, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Conagua, México, 2004.

Analizando con detalle las diferencias entre el consumo y la disponibilidad natural, en la gráfica 3 se observa que el DF es la región donde el déficit de agua por persona es más alto, 46% del agua consumida proviene de la sobreexplotación del mismo acuífero, de la importación y en menor medida de reuso. El déficit de la ZMVM es de 17.49 m<sup>3</sup>/hab/año, menor al del DF porque el superávit del Estado de México compensa el elevado déficit del DF.

Estos datos muestran los límites que se enfrentan para garantizar el suministro del agua a la ZMVM, –y en particular en el DF. Existen graves riesgos para cubrir el suministro de agua a los diferentes grupos de usuarios, situación derivada del déficit absoluto del agua. La misma información expresada en metros cúbicos por segundo indica que el déficit para la CVM es de 7.01 m<sup>3</sup>/s, y si se

considerara el déficit para la ZMVM éste sería de 10.24 m<sup>3</sup>/s. Esta situación se mantiene a costa de elevados daños a los ecosistemas, incremento de conflictos sociales por la disponibilidad del agua y elevados riesgos por los nuevos desarrollos habitacionales en el área.

## USOS DEL AGUA EN LA CVM

DE ACUERDO con el Registro Público de Derechos del Agua (Repda),<sup>5</sup> en el 2004 en la CVM se extrajeron 2,923 hm<sup>3</sup> de agua de primer uso y de reuso. Los derechos de explotación del agua se otorgan para usos específicos, con la idea de cubrir los requerimientos de las diversas actividades económicas y de las necesidades de la población asentada (gráfica 4). El abastecimiento público se refiere a los usos doméstico y público urbano, para los que se extrajeron 2,123 hm<sup>3</sup>; el usuario industria autoabastecida se refiere a los usos industriales, comerciales y de servicios que requirieron en conjunto 177 hm<sup>3</sup> y, finalmente, lo que no se puede clasificar y que se agrupa en el rubro otros usos, requirió 28 hm<sup>3</sup>. El uso agropecuario, que se refiere a los usos agrícola, acuacultura, pecuario, múltiples y otros, representa 595 hm<sup>3</sup> y se realiza fuera de la ZMVM.

GRÁFICA 4  
USOS DEL AGUA EN LA CVM, 2004



Fuente: *Compendio básico del agua 2004*, Gerencia Regional xiii, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Conagua, México.

<sup>5</sup> El Repda registra los volúmenes del recurso concesionados a los usuarios de aguas nacionales y los derechos asignados, especificando el volumen de agua a que se tiene derecho y el uso para el que se otorga.

La escasez amenaza al uso doméstico y público urbano, pues- to que requiere de la mayor cantidad del recurso, casi tres cuartas partes de la extracción total (73%).<sup>6</sup> Otros usos importantes del agua en el área urbana son el industrial, comercio y servicios, que demanda 6% de la extracción total. El sector agropecuario, se ubica fuera de la ZMVM, no enfrenta las fuertes restricciones de agua que padece el área urbana y participa con una quinta parte de la extracción en la CVM.

### *Agua suministrada y autoabastecida para cada tipo de uso*

El agua de primer uso, la que se extrae de los pozos y ríos superficiales, alcanza los 2,564 hm<sup>3</sup>; de éstos, 1,994 hm<sup>3</sup> se suministran por la red de agua potable y 570 hm<sup>3</sup> se extraen directamente por los usuarios de los cuerpos de agua subterráneos (principalmente pozos) o superficiales (ríos) basados en la posesión de derechos de extracción y algunas veces por usuarios clandestinos (gráfica 5).

GRÁFICA 5  
AGUA DE PRIMER USO POR TIPO DE USUARIO

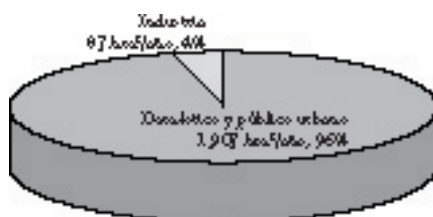


Fuente: Elaboración propia con datos de las *Estadísticas del agua 2005*, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala Región XIII, Conagua, México, DF, *Compendio básico del agua 2004*, Gerencia Regional XIII Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Conagua, México, DF, Registro Público de Derechos de Agua (Repda), Conagua, 2005 y *Censo de captación, tratamiento y suministro de agua*, *Censos económicos 1999*, INEGI, 2000.

<sup>6</sup>La Ley de Aguas Nacionales (LAN) define claramente el orden de prelación en el caso de enfrentar situaciones de emergencia, escasez extrema, sobreexplotación o reserva, en cuyo caso tendrá prioridad el uso doméstico (Capítulo IV, artículo 13). La LAN también contempla cambios en el orden de prelación cuando todas las partes involucradas lo aprueben, incluida la Conagua.

El agua potable (gráfica 6) se suministra por la red de abastecimiento público urbano que se extiende por toda la ZMVM, y como se describe en la gráfica, por este sistema se distribuyó un volumen de 1,994 hm<sup>3</sup> en el 2004, en donde prácticamente la mayoría se destina al abastecimiento público, ya que demanda 96% del total; el restante 4% es para uso industrial.

GRÁFICA 6  
AGUA DE PRIMER USO. AGUA POTABLE SUMINISTRADA  
POR TIPO DE USUARIO EN LA ZMVM, 2004



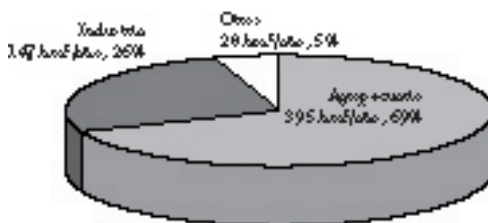
Fuente: Gráfica de elaboración propia con datos de Actividades de Producción de Bienes, *Censos económicos 1999, Captación, tratamiento y suministro de agua*, INEGI, 2000. *XV Censo industrial, industrias manufactureras*. INEGI, México, 2000. *Censos económicos 1999, Materias primas y productos 1999*. Aguascalientes, Ags., 2000.

La red de abastecimiento público urbano es una gran telaraña de ductos que la hacen una gran obra de ingeniería con kilómetros de tuberías por toda la ZMVM. El agua que alimenta a esta extensa red de abastecimiento proviene principalmente de los pozos cavados en la misma cuenca (agua subterránea), de agua importada de las cuencas Lerma y Cutzamala y de ríos, presas, lagos, etcétera (agua superficial). El agua una vez potabilizada se suministra a las viviendas, el comercio, los servicios y la industria mediante conexiones de diversos diámetros a la red de suministro urbano de la ZMVM.

El agua autoabastecida es extraída directamente por los usuarios de los cuerpos de agua subterráneos o superficiales de acuerdo con lo que señalen sus derechos de explotación del recurso. Según el Repda, en la CVM se han otorgado derechos que permiten extraer agua directamente a los usuarios por 570 hm<sup>3</sup>. El uso

agropecuario, tiene una cuota de extracción de agua superficial de 395 hm<sup>3</sup>, que representa 69% del autoabastecimiento; la industria manufacturera extrae 147 hm<sup>3</sup>, que equivale a 26% y el restante 5% se destina a otros usos (gráfica 7).

GRÁFICA 7  
AGUA DE PRIMER USO:  
AGUA AUTOABASTECIDA EN LA CVM, 2004



Fuente: Gráfica de elaboración propia con datos de Actividades de Producción de Bienes, Censos económicos 1999, Captación, tratamiento y suministro de agua, INEGI, 2000. XV Censo industrial, industrias manufactureras, INEGI, México, 2000. Censos económicos 1999, Materias primas y productos 1999. Aguascalientes, Ags., 2000.

### *Suministro de agua potable para uso doméstico y público urbano en la ZMVM*

El suministro de agua potable por la red en la ZMVM alcanzó la cifra de 1,994 hm<sup>3</sup> en el 2004. De este volumen, a la industria manufacturera se le suministran 87 hm<sup>3</sup> y a los usuarios domésticos el impresionante volumen de 1,907 hm<sup>3</sup>, que cubre básicamente a las viviendas, oficinas de gobierno y el regado de jardines. Para mantener este suministro de agua potable, se sobreexplotan los cuerpos de agua subterráneos y se importa agua de cuencas aledañas, sin embargo, esta extracción resulta insuficiente para satisfacer la demanda que exige el crecimiento de las viviendas y de la actividad económica.

Las restricciones para continuar con la misma política son varias. La sobreexplotación de los cuerpos de agua afecta gravemente el hundimiento de los suelos y a los ecosistemas, por lo que la vía posible es que se recurra a la importación de agua de nuevas



cuencas aledañas a la ZMVM a un costo que resulta muy alto, económica y ecológicamente. Otra vía es que tanto las autoridades hídricas como los diversos usuarios acuerden realizar un uso eficiente del recurso y valorarlo en una nueva dimensión.

Aun cuando la cobertura del suministro de agua potable es elevada y se ubica entre las más altas del país, 920,000 personas en la ZMVM no tienen agua potable en sus hogares. A esta nueva forma de administrar el agua se le conoce como administración del recurso por la vía de ajustes en la demanda, y se refiere a las acciones que los usuarios del agua deben realizar para hacer lo mismo o más con menos cantidad del recurso.

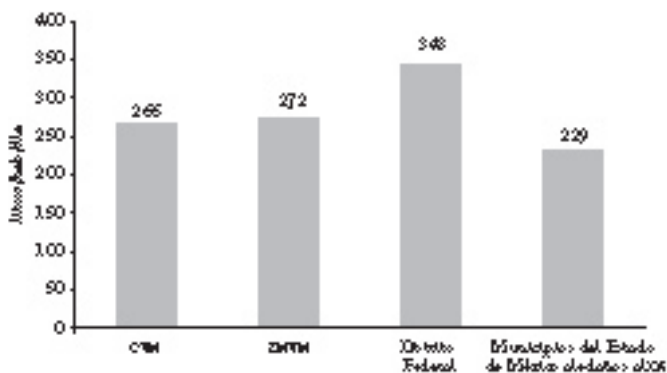
### *Abastecimiento de agua potable a la población de la ZMVM*

En la ZMVM el consumo de agua potable promedio por persona es de 272 litros por día, sin embargo, el patrón de consumo varía en las dos regiones políticas que la integran, no obstante que la red de distribución sea la misma. En el DF el consumo promedio per cápita diario es de 343 litros, en tanto que en los municipios aledaños del Estado de México es de 229.36 litros, es decir, un usuario de agua del DF consume diario 114 litros más que en el Estado de México (gráfica 8). ¿Cómo se explica esta disparidad?

La marcada diferencia en el consumo promedio per cápita diario entre ambas demarcaciones se explica en parte por la diferencia de tarifas para el agua de uso doméstico.

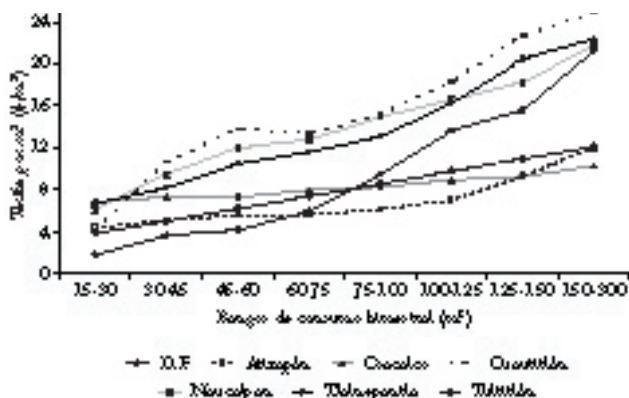
Como se observa en la gráfica 9, en el DF el agua es más barata que en el Estado de México, para el 2005, y esto se ha mantenido sistemáticamente durante mucho tiempo, no obstante en los últimos años se han realizado ajustes que tienden a igualarlas, como se observa en los rangos de consumo mayores a los 75 m<sup>3</sup> al bimestre. La estrategia de suministrar agua potable barata a los habitantes del DF ha propiciado que tengan la cultura del desperdicio y una baja valoración del recurso, lo que no es consistente con el elevado riesgo que se corre de no poder contar con este recurso a mediano y largo plazo, por lo que es imprescindible que los gobiernos modifiquen las tarifas y se defina una política para aumentar la valoración del agua por parte de la población en el DF.

GRÁFICA 8  
AGUA POTABLE PARA USO DOMÉSTICO, 2004.  
SUMINISTRO PROMEDIO DE LITROS DE AGUA  
POR HABITANTE



Fuente: Elaboración propia con datos del *Compendio básico del agua 2004*, Gerencia Regional XIII, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Conagua, México. *XI y XII Censo general de población y vivienda, 1990 y 2000*, INEGI. *II Censo de Población y vivienda 2005*, INEGI. Registro Público de Derechos del Agua, Conagua, México, 2005.

GRÁFICA 9  
COMPARATIVO DE TARIFAS DE USO DOMÉSTICO  
POR RANGOS DE CONSUMOS, 2005

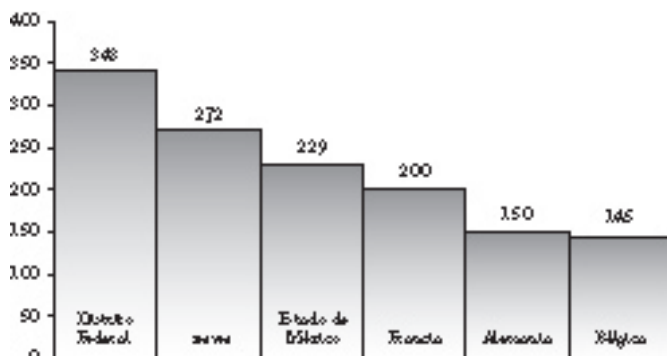


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de *Estadísticas del agua*, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Región XIII, Conagua, México, 2005.

De acuerdo con la gráfica 10, el consumo promedio por persona en el DF y aun en el Estado de México puede bajar y alcanzar los niveles de eficiencia de otros países. Los mayores ajustes se deben dar en el DF pero también en el Estado de México, para llegar a niveles de consumo promedio equivalentes a los de Alemania, que son de 150 l/hab/día. Los mecanismos para lograrlo son diversos, entre ellos destaca la aplicación de tarifas más elevadas y homogéneas en toda la ZMVM.

GRÁFICA 10

DOTACIONES MEDIAS POR PERSONA EN LITROS/HAB/DÍA



Fuente: Elaboración propia con datos del *Compendio básico del agua 2004*, Gerencia Regional XIII, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala. Conagua, México, 2004. XI y XII *Censo general de población y vivienda, 1990 y 2000*, INEGI. II *Censo de población y vivienda 2005*, INEGI. Registro Público de Derechos de Agua, Conagua, México, 2005. A. Breña (2007), Diplomado "Manejo integral y sostenible del agua", Módulo 1. Tema II: Ciclo hidrológico: perspectiva mundial y local de la disponibilidad del agua –fuentes de abastecimiento– manejo integral del agua, marzo-junio de 2007, México, DF.

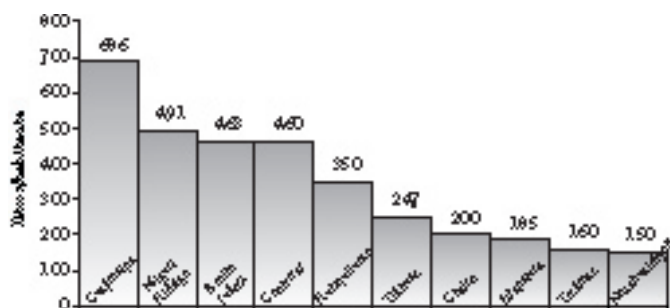
### *Dotaciones de agua entre las diferentes demarcaciones políticas en la ZMVM*

Actualmente existe gran disparidad en las dotaciones de agua entre las demarcaciones políticas en la ZMVM, lo que tiene que ver con el tandeo de agua (suministro intermitente) dentro de cada demarcación, por ejemplo, como se observa en la gráfica 11, en el DF existe gran divergencia en la dotación de agua entre las delegaciones Cuajimalpa, Miguel Hidalgo, Benito Juárez y Magdalena

Contreras, en donde se presenta una dotación superior a los 343 litros de agua potable per cápita diario, que es la media del DF, en tanto que en Tláhuac, la dotación por persona se encuentra muy por debajo de la media. En el caso del Estado de México, se observa la misma situación. En Chalco, la dotación por persona al día es de 200 litros y de 160 litros en Tecámac.

GRÁFICA 11

### DOTACIONES DE AGUA EN DELEGACIONES DEL DISTRITO FEDERAL Y MUNICIPIOS DEL ESTADO DE MÉXICO



Fuente: A. Breña (2007), Diplomado "Manejo integral y sostenible del agua", Módulo 1. Tema II: Ciclo hidrológico: perspectiva mundial y local de la disponibilidad del agua –fuentes de abastecimiento– manejo integral del agua, marzo-junio de 2007. México, DF.

La política de tandeo o suministro intermitente en las zonas de menor dotación de agua es parte del proceso para distribuir el déficit de agua de 10.24 m<sup>3</sup>/s para la ZMVM, en donde la carencia de agua se absorbe entre las demarcaciones con menor dotación. Las regiones en donde la dotación del vital líquido es baja están sumamente pobladas. En el DF, las delegaciones más afectadas son, de acuerdo con el número de habitantes: Iztapalapa (1'820,888), Gustavo A. Madero (1'193,161) y en el Estado de México, los municipios de Nezahualcóyotl (1'140,528), Naucalpan (821,442) y Ecatepec (1'688,258). Al problema del tandeo en estas demarcaciones se agrega el hecho de que la calidad del agua en el oriente de la ciudad es mala por la sobreexplotación de pozos en esa región, es decir, porque la extracción del agua se hace a niveles

muy profundos. Esto refleja la forma en que la carencia de agua se concentra sobre un sector de la población de la ZMVM, lo que no es justificable desde el punto de vista de la equidad.

En el Estado de México y en determinados lugares del DF, hay regiones con un crecimiento inmobiliario muy dinámico, lo que es inexplicable desde el punto de vista de los permisos de construcción, que no deberían otorgarse si no se tiene garantizado el suministro de agua potable. La manera en que han operado las empresas inmobiliarias es que resuelven el suministro de agua mediante la compra de los derechos de explotación de pozos a los agricultores propietarios de derechos de agua para uso agrícola. Estas empresas posteriormente cambian los derechos a uso doméstico. Las unidades habitacionales sobreexplotan el recurso, por lo que en el mediano o largo plazo enfrentarán problemas en el suministro de agua y afectarán a las familias que compraron sus departamentos y casas, por lo que pondrán en alto riesgo su inversión.

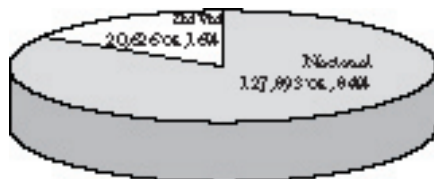
### *El uso industrial y límites del suministro de agua autoabastecida y potable*

En la ZMVM se presenta la mayor concentración industrial del país. En el 2004, esta región generó 32% del PIBM del país. Los establecimientos industriales usuarios de agua potable en los últimos 10 años han crecido a una tasa de 4.5% al pasar de 13,252 en 1993, a una cifra de 20,026 unidades en 2003. El ritmo de crecimiento es diferente para las dos regiones más importantes que la integran. En el DF los establecimientos aumentan a una tasa de 2.3%, en tanto que en el Estado de México lo hacen a un ritmo de 5.9%, lo que describe la nueva dinámica experimentada por la reciente expansión de empresas en la ZMVM (gráfica 12).

El ritmo de crecimiento de la industria manufacturera usuaria de agua aumenta su demanda del recurso, por lo que es importante considerar las restricciones que enfrenta su abastecimiento. En 2004, la industria requirió de 234 hm<sup>3</sup> de agua de primer uso, 63% (147 hm<sup>3</sup>) fue por autoabastecimiento y 37% (87 hm<sup>3</sup>) agua

## GRÁFICA 12

# UNIDADES ECONÓMICAS USUARIAS DE AGUA POTABLE EN EL DF-ESTADO DE MÉXICO Y A ESCALA NACIONAL, 2004



Fuente: Elaboración propia con datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), *Censos económicos 2004*.

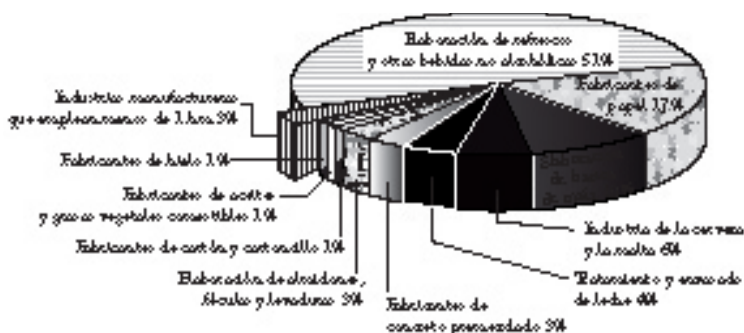
potable suministrada por la red de abastecimiento público urbano. La industria autoabastecida extrae 83% del agua de los pozos del Estado de México y 17% del DF.

Resulta importante conocer el listado de las empresas que cuentan con los permisos para extraer directamente el agua de pozos, sin embargo, a la fecha no se publica dicha información, por lo que en términos muy gruesos, se tiene que la industria manufacturera se autoabastece de 127.54 hm³ de los pozos ubicados en el DF y el Estado de México, que representa 87% del agua autoabastecida, en tanto que los servicios como hotelería y hospitales extraen un volumen de 19.45 hm³ de agua para el mismo 2004 y equivalente a 13% de la misma magnitud.

Los requerimientos de agua potable para la industria son de menor magnitud. De los 87 hm³ en el 2004, la industria manufacturera ubicada en el Estado de México requirió 59 hm³ debido a su mayor presencia industrial, y la ubicada en el DF, necesitó un volumen de 28 hm³.

Las actividades industriales que demandan agua potable en la ZMVM se describen en la gráfica 13. Son diez las ramas industriales que concentran el uso del agua potable en la ZMVM; éstas explican 97% del agua potable suministrada en la región, y son sólo cuatro ramas las que concentran 87% de la demanda total de ese recurso.

GRÁFICA 13  
INDUSTRIAS MANUFACTURERAS USUARIAS  
DE AGUA POTABLE UBICADAS EN LA ZMVM, 1998



Fuente: XV Censo industrial, industrias manufactureras, México, 2000. Censos económicos 1999, Materias primas y productos, 1999, INEGI, Aguascalientes, 2000.

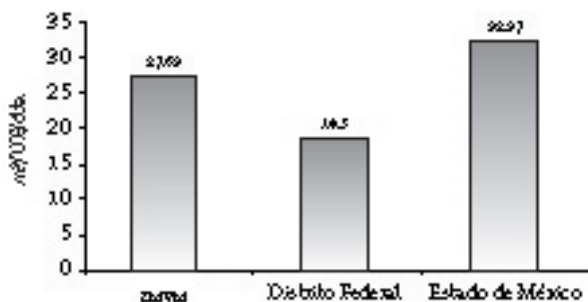
Las cuatro grandes industrias consumidoras de agua son: elaboración de refrescos y otras bebidas no alcohólicas, fabricación de papel, elaboración de harina de maíz y la industria de la cerveza y la malta. Se adicionan seis ramas que demandan agua en un porcentaje que oscila entre 1 y 4% de la demanda total y son las siguientes, señaladas en orden de importancia: tratamiento y envasado de leche; elaboración de almidones, féculas y levaduras; fabricación de cartón y cartoncillo; fabricación de aceites y grasas vegetales comestibles; fabricación de hielo y fabricación de concreto premezclado.

### *Uso eficiente del agua en la ZMVM*

La industria manufacturera ubicada en el Estado de México usa más agua potable en promedio por establecimiento, 32 m<sup>3</sup> al día, en tanto que en el DF, un establecimiento emplea casi la mitad de la que utiliza uno del Estado de México, 18.5 m<sup>3</sup> (gráfica 14), lo cual parece responder al manejo de las tarifas de agua potable en ambas demarcaciones.

GRÁFICA 14

### USO PROMEDIO DE AGUA POTABLE POR ESTABLECIMIENTO EN m<sup>3</sup> POR UNIDAD ECONÓMICA AL DÍA, 2004



Fuente: Elaboración propia con datos del *xv Censo industrial. Industrias manufactureras*. INEGI, México, 2000. *Censos económicos 1999, Materias primas y productos 1999*. Aguascalientes, 2000. *Censo de captación, tratamiento y suministro de agua*, *Censos económicos 1999*, INEGI, 2000. Registro Público de Derechos de Agua (Repda), Conagua, México, 2005.

GRÁFICA 15

### COMPARATIVO DE LAS TARIFAS PROMEDIO DE AGUA POTABLE PARA LA INDUSTRIA MANUFACTURERA EN EL DF Y LAS DOS ZONAS GEOGRÁFICAS DEL ESTADO DE MÉXICO, 1999-2005



Fuente: Código financiero del Distrito Federal 2005. *Gaceta del Gobierno del Estado de México*, 2004.

Los volúmenes de agua potable demandados por los establecimientos industriales del Estado de México y el DF parecen res-



ponder al manejo de sus respectivas tarifas, de acuerdo con la gráfica 15. Para el 2004, el  $\text{m}^3$  de agua en el DF se vendía a 17.95 pesos y en el Estado de México a 12.08 pesos, información que muestra lo que ha sido la política de tarifas en la industria, es decir, sistemáticamente más elevadas en el DF que en el Estado de México. Las tarifas más bajas en el Estado de México representan un factor que explica la preferencia de la industria de manufacturas usuarias de agua para asentarse en ese estado y que ha generado un proceso de relocalización de la industria manufacturera usuaria de agua del DF hacia el Estado de México (Morales y Rodríguez, 2007).

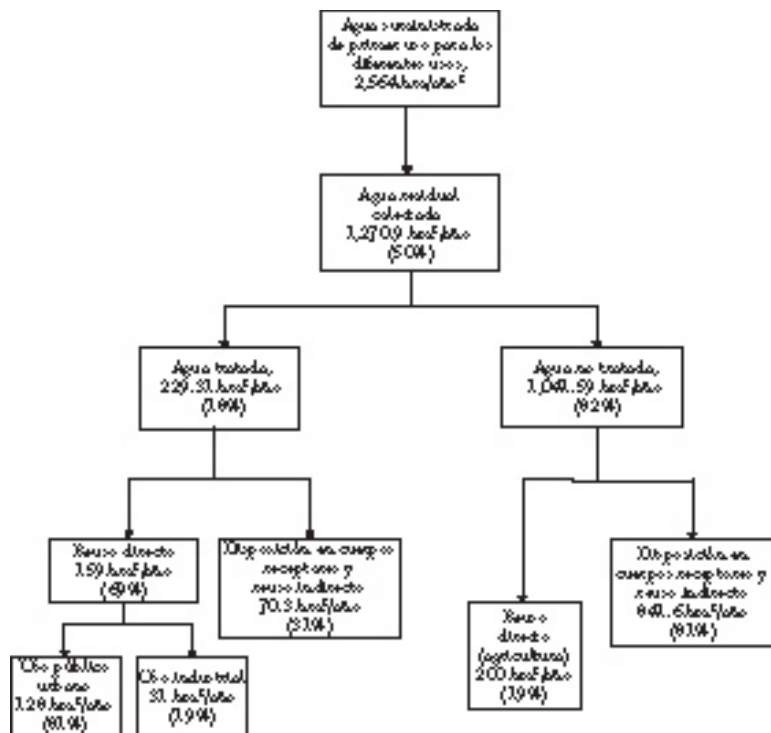
#### EL REUSO, FUENTE POTENCIAL DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA CVM

EL AGUA de primer uso, después de ser utilizada por los usos consuntivos doméstico e industrial, genera un volumen de agua residual que se colecta en los ductos del drenaje de la ZMVM y que explican los  $1,270.9 \text{ hm}^3$  al año (véase figura). Este volumen es agua que potencialmente podría ser considerada como fuente permanente de abastecimiento, representa 50% del agua suministrada de primer uso.

Conforme se observa en la figura, la cantidad de agua residual que recibe algún tipo de tratamiento es de  $229 \text{ hm}^3$ . Esto representa sólo 18% del total del agua residual, por lo que prácticamente cuatro quintas partes no lo recibe, que en volumen representan  $1,041.59 \text{ hm}^3$ . A la fecha, este inmenso volumen es descargado a los cuerpos de agua superficial y utilizado para riego.

Del agua tratada ( $229 \text{ hm}^3$ ), 69% se destina al reuso directo y el restante 31% para reuso indirecto y cuerpos de agua receptores. El reuso directo se presenta cuando las aguas residuales tratadas son puestas en un sistema de distribución, incluidos depósitos naturales, para ser entregadas a un usuario específico. En la ZMVM se destinan básicamente para público urbano y en forma secundaria para uso industrial.

## RECORRIDO DEL AGUA DE PRIMER USO HASTA EL REUSO Y DESCARGA FINAL EN LA ZMVM



### Notas:

El agua suministrada es la extraída en la misma cuenca y agua importada de cuencas aledañas.

El agua tratada corresponde a la procedente de las plantas de tratamiento de la ZMVM.

El agua residual corresponde a la CVM y suponemos que corresponde a la ZMVM, dado que ésta explica la parte urbana de la cuenca.

El agua tratada corresponde a la procedente de las plantas de tratamiento de la ZMVM.

Fuente: Elaboración propia con información de: el inventario nacional de plantas de tratamiento. Estadísticas del agua. <http://www.cna.gob.mx/cNA/Espanol/Publicaciones/InventarioNacional04/ptgeneral02.pdf>, consultada el 29 de marzo de 2007). *Estadísticas del agua 2004 y 2005*, Región XIII Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Conagua, México, 2004, 2005. *Compendio básico del agua 2004*, Gerencia Regional XIII Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Conagua, México, 2004.

El reuso indirecto se presenta cuando las aguas residuales tratadas (o no) son ingresadas a un cuerpo de agua superficial o subterráneo y pasan a formar parte del agua que será empleada posteriormente en usos diversos; 31% del agua tratada se destina

al reuso indirecto, lo que ayuda a que los cuerpos de agua superficiales no se vean sujetos a una elevada contaminación.

El nulo manejo del agua residual sin tratamiento resulta más que alarmante en la ZMVM. Conforme a la NOM-002-ECOL-1996<sup>7</sup> un volumen tan grande como 841.6 hm<sup>3</sup> de agua residual debe ser tratado antes de descargarse a los cuerpos de agua de jurisdicción federal. Sin embargo, la norma ambiental no se cumple ni por el Gobierno del Distrito Federal ni por el del Estado de México, que descargan sus aguas residuales sin tratamiento a cuerpos de agua superficiales. Parte del agua residual, 200 hm<sup>3</sup>, es entregada a los campesinos de la cuenca para ser usada como agua de riego en la agricultura.

El tratamiento del agua residual es una prioridad en esta cuenca. Es preocupante el daño inflingido a los cuerpos de agua receptores, como ríos y presas en las que se depositan. Daña la calidad de los suelos, ya que contamina y extingue flora y fauna, entre otros graves problemas.

El agua residual utilizada (con o sin tratamiento) alcanza un volumen de 359 hm<sup>3</sup>, y representa 12% de la extracción total de agua en la cuenca. Aunque con diferente intensidad y nivel de tratamiento, todos los usos del agua que se presentan en la ZMVM demandan agua residual (véase figura), y es claro que es una fuente potencial de suministro y podría aumentar significativamente si se aplica una política que fomente la creación de infraestructura para el tratamiento de agua y de un mercado de agua tratada. El crecimiento de esta fuente de suministro es clave ya que disminuye la sobreexplotación de los cuerpos de agua de la cuenca.

Como se presenta en la figura, el reuso es significativo en las actividades agrícolas, con 200 hm<sup>3</sup>, y en el público urbano, con 128 hm<sup>3</sup>, mientras la industria reusa sólo 31 hm<sup>3</sup> al año. Desde esa perspectiva, hay un mercado potencial muy importante para desarrollar el reuso de agua en ciertas actividades económicas, y parece ser un camino adecuado ante los límites en el abastecimiento de agua de primer uso en la ZMVM.

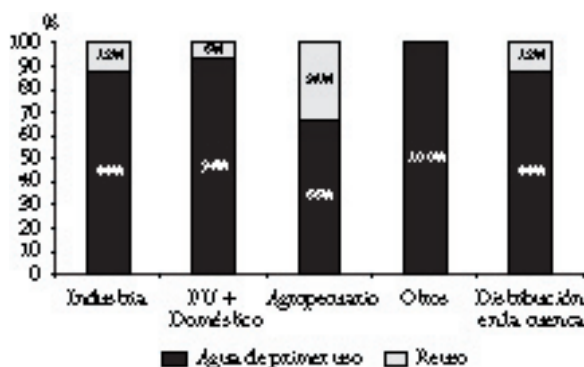
<sup>7</sup>La NOM-002-ECOL-1996 establece los "Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal".

Aunque el tema del saneamiento no es el objetivo de este trabajo, es imposible pasar por alto la importancia de aumentar el tratamiento de aguas residuales antes de su descarga a los cuerpos de agua nacionales, debido a la gravedad de la contaminación de éstos. Asimismo, es imprescindible diseñar un mapa de riesgos de inundaciones que identifique las zonas más susceptibles, para alertar a la población sobre los peligros que enfrentan sus viviendas, de tal forma que se busque frenar la extracción de agua subterránea, que resulta ser la principal causa del hundimiento de los suelos.

*Patrón de consumo respecto al agua de reuso  
y de primer uso para cada tipo de usuario*

Como se observa en la gráfica 16, en la barra de distribución en la Cuenca, 88% del agua que se extrae es de primer uso y sólo 12% es de reuso, lo que muestra claramente que la política hídrica no ha fomentado la sustitución del empleo de agua de primer uso por agua de reuso.

GRÁFICA 16  
PARTICIPACIÓN DEL AGUA DE PRIMER USO  
Y DE REUSO POR TIPO DE USUARIO EN LA CVM, 2004



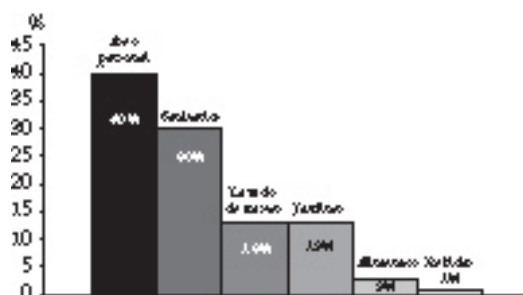
Fuente: Compendio básico del agua 2004. Gerencia Regional XIII, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Conagua, México, 2004.

La política hídrica en la cuenca puede fomentar el empleo de agua tratada entre los diversos usuarios, mediante incentivos importantes sobre precios, así como incentivos fiscales, entre otras medidas. Esta política será más efectiva conforme se dirija hacia usuarios específicos de agua tratada.

*Patrón de consumo del uso doméstico  
y público urbano en la ZMVM*

En la gráfica 16 se observa que 94% del consumo doméstico y público urbano es agua de primer uso y sólo 6% es agua de reuso, lo que no sorprende por ser agua básicamente para uso personal. Aquí vale la pena preguntarse si es posible ampliar el empleo de agua de reuso en el consumo doméstico y no sólo en el público urbano, considerando la existencia de niveles de tratamiento avanzados.

GRÁFICA 17  
DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA EN  
CASAS-HABITACIÓN, 1997



Fuente: Agustín Breña (2007), Diplomado “Manejo integral y sostenible del agua”, Módulo 1. Tema 11: Ciclo hidrológico perspectiva mundial y local de la disponibilidad del agua –fuentes de abastecimiento– manejo integral del agua, marzo-junio de 2007, México, DF.

En la gráfica 17 se presenta la forma en que las familias distribuyen el uso del agua en diversas necesidades. Se observa que sólo demandan 4% del consumo total de agua para las necesida-

des básicas, como la preparación de alimentos y bebidas. El consumo que se requiere de agua de primer uso en casas-habitación representa 57% del consumo total de agua, que incluye, de acuerdo con la gráfica, bebidas, alimentos, lavado de trastos y aseo personal. Los datos sugieren que el uso del agua para jardines y sanitarios podría ser satisfecho con agua de reuso lo que representaría 43% del consumo de agua en las casas, lo cual evidencia la importancia de la exploración del empleo de agua de reuso para uso doméstico. Este dato también apoya la idea de que esta necesidad puede ser cubierta con agua de lluvia captada en escala doméstica.

De la dotación de agua en los hogares, 30% se destina a sanitarios y aseo personal, lo cual refleja el amplio margen de manobra que existe en los hogares para realizar ahorros significativos en agua de primer uso y, con el tiempo, la sustitución por agua de reuso.

#### *Patrón de consumo del uso industrial en la ZMVM*

En el uso industrial del agua se esperarían mayores volúmenes de agua de reuso. De acuerdo con la gráfica 16, sólo 12% corresponde al empleo de agua de este tipo. Este porcentaje es muy bajo en tanto existen muchos procesos de producción en los que se puede sustituir agua de primer uso por agua de reuso. En este sentido, es cuestionable el que la autoridad que define la política hídrica no fomente su empleo otorgando más derechos para explotar el agua residual con el objeto de que se forme un mercado de agua tratada dentro de la industria manufacturera y de los servicios anexos. En este proceso, además de disminuir la presión sobre el agua de primer uso, la industria se vería favorecida por un ahorro en sus costos. El uso de esta fuente de suministro es clave para evitar que en el mediano o largo plazo la industria manufacturera de la ZMVM tenga que desplazarse a nuevas regiones donde no enfrente las restricciones de suministro y los costos crecientes por el agua de primer uso.

*Patrón de consumo del uso agropecuario en la CVM*

En la misma gráfica 16, se muestra que el uso agropecuario presenta el mayor porcentaje de agua de reuso. Una tercera parte del agua empleada en esta actividad, sin embargo, 200 hm<sup>3</sup> se usan sin ningún tratamiento, lo que genera otro tipo de problemas, como los efectos a la salud del agricultor y de los consumidores de sus productos agrícolas. Esto deja en entredicho la ventaja de su empleo.

Es innegable que para el sector agrícola el agua residual generada en la ZMVM representa una gran fuente de abastecimiento, sin embargo, es altamente recomendable que sea agua tratada. Los problemas de salud que genera el agua residual sin tratamiento son muy graves y diversos. Dos terceras partes del agua usada en la agricultura provienen de cuerpos de agua superficiales de primer uso, existiendo la posibilidad de ser sustituida por agua residual tratada.

## CONSIDERACIONES FINALES

LA BAJA disponibilidad natural del agua en la CVM es un grave problema para el crecimiento económico y poblacional de la ZMVM. Hay un alto riesgo de que en el mediano plazo aumente el desabasto del vital líquido a más hogares, establecimientos industriales y a los servicios. Los usos público urbano e industrial compiten entre sí por este recurso. De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales, el uso público urbano tiene prioridad, por lo que la industria se encuentra en una posición desventajosa.

La extracción de agua de primer uso en la CVM se obtiene básicamente de los cuerpos de agua subterráneos (88%) y la extracción de agua superficial desempeña un papel secundario (12%). Específicamente, en 2004 se extrajeron 1,702 hm<sup>3</sup> del acuífero de la ZMVM, lo que rebasa por mucho la recarga natural anual de agua de estos cuerpos, misma que alcanza un volumen de 751 hm<sup>3</sup>, y explica un nivel de sobreexplotación de 951 hm<sup>3</sup> de los cuerpos de agua subterráneos.

La importación de agua ha representado una solución parcial a la escasez de este recurso en la cuenca. Para 2004 se importaron 622 hm<sup>3</sup> anuales; tres cuartas partes provienen del Sistema Cutzamala y una cuarta parte del Sistema Lerma. El Sistema Cutzamala transporta agua de origen superficial hacia la Ciudad de México en un largo y costoso recorrido. El agua importada de la Cuenca del Balsas por medio del Sistema Lerma es agua extraída de acuíferos y también enfrenta problemas para mantener o aumentar su exportación.

El grueso del agua potable suministrada proviene de cuerpos de agua subterráneos que se encuentran sobreexplotados. Los hogares y la actividad comercial enfrentan un alto riesgo ante la eventual reducción o suspensión en los volúmenes de agua suministrada; estos problemas se enfrentan ya en regiones específicas. ¿Qué se puede hacer para asegurar el abastecimiento de dichos usuarios en el futuro? Hasta ahora, la importación de agua ha sido una alternativa que ha ayudado a superar la escasez, sin embargo, su aumento presenta límites económicos y ambientales difíciles de superar, aunado a que no es fácil que los propietarios de los derechos del agua de otras cuencas estén dispuestos a cederlos a una ciudad sedienta y que no tiene fin en sus demandas, por lo que esta opción no puede ser permanente y de largo plazo, aún más, si consideramos los volúmenes que se pueden importar respecto a los elevados volúmenes que se demandan.

Los límites al abastecimiento del agua afectan a todos los usuarios establecidos en la ZMVM. Sin embargo, el uso público urbano es el más vulnerable, puesto que requiere aproximadamente tres cuartas partes de la extracción total, lo que implica límites al crecimiento urbano y al desarrollo de viviendas por el hecho de no existir el recurso para abastecer su demanda, salvo que se continúe con el esquema de sobreexplotación de los acuíferos.

El sector industrial usuario de agua demanda 6% de la extracción total. Las empresas que son grandes usuarias de agua enfrentan límites a su crecimiento, como las productoras de bebidas no alcohólicas y alimentos, entre otras. Las industrias que usan inten-



sivamente agua ya no tienen cabida en la ZMVM; éstas deben reubicarse en regiones en donde se encuentre agua en abundancia.

Los usuarios que dependen del abastecimiento subterráneo son los más vulnerables. El uso público urbano depende de esta fuente en 62%, y la industria en 70%, y son precisamente la población de la ZMVM y las industrias, comercios y empresas de servicios los que enfrentan un alto riesgo en la continuidad de sus actividades básicas, debido a la dificultad para su futuro abastecimiento.

El agua residual tratada es la tercera fuente de abastecimiento de la ZMVM y alcanza una participación de 12% en la extracción total. En la actualidad, su demanda es poco importante, pero es imprescindible aumentarla, dados los límites a que se ha llegado con las otras fuentes de abastecimiento y los grandes avances tecnológicos para transformar el agua residual en agua tratada de calidad para uso industrial, para abastecimiento público e incluso en agua potable. Sin embargo, a la fecha el porcentaje de agua residual tratada y reusada es bastante bajo. La mayoría de las descargas de agua residual se exportan a la cuenca de Tula sin previo tratamiento, lo que ocasiona graves problemas en los cuerpos de agua por donde transita antes de llegar al mar.

La CVM no tiene salida natural para descargar sus aguas residuales por la forma cóncava que presenta, sin embargo, dicho estado natural ha sido modificado por medios artificiales para convertirla en una cuenca que trasfiere sus aguas residuales y pluviales a la Cuenca de Tula. En 2004 se exportaron a dicha cuenca 1,041.59 hm<sup>3</sup> de aguas residuales colectadas de origen urbano e industrial. El gran inconveniente es que el agua que se exporta contiene elevados niveles de contaminantes, por lo que los usos a que se destina al final del tubo han degradado la calidad y eficiencia de las actividades agrícolas. En la actualidad, esto último se ha convertido en uno de los problemas más graves de la región en que se descarga, en términos de salud de la población y deterioro de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, así como de daño de sistemas ecológicos completos.

El tratamiento del agua residual aparece como una fase esencial para saber el tipo de uso al cual se puede destinar. En un con-

texto de escasez, como es el caso de la ZMVM, esta vía es importante para el aumento de la oferta de agua, aunque se debe dejar claro que hay mucho por hacer con esta fuente potencial de abastecimiento del agua.

El sector industrial ha recurrido al agua de reuso. En 2004 representaba 17.5% de su abastecimiento total. Su baja participación indica que queda mucho por hacer para que esta vía de suministro funcione. El reuso en el uso público urbano debe aumentar para liberar volúmenes importantes de agua de primer uso.

Aun cuando en general el cobro del agua potable no se acerca a su valor real, lo cierto es que la tarifa más alta entre el conjunto de los usuarios corresponde al sector industrial, particularmente el segmento localizado en el DF. Las tarifas para los usuarios domésticos son muy bajas debido al elevado subsidio del gobierno –aunque presentan una estructura creciente a medida que aumenta el volumen de consumo– y se sugiere su revisión para acercarlas gradualmente a su valor real, por supuesto dentro de un esquema que considere la posición diferente de los hogares en la distribución del ingreso en la región. La contribución de la industria en la captación de recursos para el mantenimiento de la red de suministro de agua potable es clave. El sector doméstico en el DF se caracteriza por una baja cobertura de cobro e irregularidad en su contribución.

En la ZMVM hay dos estructuras de tarifas de agua potable, tanto para el sector doméstico como para la industria, además son diferentes la del DF de la del Estado de México, no obstante que la red de suministro forma parte de una misma infraestructura hidráulica. El criterio central de su diferenciación es que responden a dos delimitaciones políticas diferentes con criterios distintos de gestión del recurso. Las tarifas que se aplican a la industria en el DF son más altas respecto a las del Estado de México. En el sector doméstico se presenta lo opuesto: las tarifas más bajas corresponden al DF, lo cual aumenta la cultura de la ineficiencia y el desperdicio del vital líquido, contrario a la grave situación de escasez a la que se enfrenta. Resulta irracional desde el punto de vista económico y ambiental, el que empresas y hogares ubicados den-

tro de una misma área urbana paguen cuotas diferentes para el mismo recurso. Esto ha deformado la conducta de las industrias y los hogares con respecto a la valoración del recurso. Dichos usuarios pretenden obtener agua barata por cualquier medio, por lo que es recomendable uniformar la tarifa en toda la ZMVM para enviar señales correctas a los usuarios.

Mantener la actual oferta de agua en la ZMVM implica costos ambientales elevados porque cada vez se extrae de mayor profundidad, lo cual causa daños ecológicos irreparables, aunado al hecho de mayores costos de extracción, así como a costos de importación más elevados. También se enfrentan mayores costos sociales, ya que los portadores de derechos de otras cuencas ya no quieren enviar el agua de su jurisdicción hacia la ZMVM sin ser compensados. Ante esto, los gobiernos involucrados en el suministro del agua a la ZMVM no tienen otra opción más que revisar su política hídrica hacia una práctica dirigida a la administración de la demanda.

## BIBLIOGRAFÍA

- BREÑA, A. (2007), Diplomado “Manejo integral y sostenible del agua”, Módulo I. Tema II: Ciclo hidrológico perspectiva mundial y local de la disponibilidad del agua –fuentes de abastecimiento– manejo integral del agua, marzo-junio de 2007, México.
- DÁVILA, I.H.R. y T.R.M. Constantino (2007), “Sistema de uso de derechos de agua potable en el Distrito Federal”, en N.J.A Morales y T.L. Rodríguez (coords.), *Economía del agua. Escasez del agua y su demanda doméstica e industrial en área urbana*, México, UAM, Miguel Ángel Porrúa, pp. 149-177.
- , L.I. Escobedo y R.M.P. García (2006), “Análisis exploratorio y prospectivo del uso doméstico del agua en México”, en R. Constantino, *Agua, seguridad nacional e instituciones. Conflictos y riesgos para el diseño de políticas públicas*, México, UAM/IILSEN, pp. 127-203.
- FOSTER, S.S.D. y P.J. Chilton (2004), “Downstream of downtown: urban wastewater as groundwater recharge”, *Hydrogeology Journal* (12), pp. 115-120.
- FOSTER, S.A. y Lawrence B. Morris (1988), *Las aguas subterráneas en el desarrollo urbano; evaluación de las necesidades de gestión y formulación de*

- estrategias*, Washington, DC, Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial, documento técnico del Banco Mundial núm. 390.
- GARZA, G. (2001), “La megalópolis de la Ciudad de México en el ocaso del siglo XXI”, en Cecilia Rabell Romero y José Gómez León Cruces, *La población en México: tendencias y perspectivas sociodemográficas hacia el siglo XXI*, México, Conapo y FCE.
- JACOBO-VILLA, M.A. y Elsa Saborío (2004), *La gestión del agua en México: los retos para el desarrollo sustentable*, México, UAM/Miguel Ángel Porrúa.
- MORALES, J.A. y L. Rodríguez (2006), “Perspectivas de seguridad nacional: el agua y la estructura industrial en México”, en R. Constantino (ed.) *Agua, seguridad nacional e instituciones. Conflictos y riesgos para el diseño de políticas públicas*, México, UAM/IILSEN, pp. 205-311.
- OECD (2003), *Water: Performance and challenges in OECD countries*, Environmental performance reviews, París.
- SAINZ, S., J.M. Becerra Pérez (s/f), *Los conflictos por agua en México*, México, Instituto Nacional de Ecología, <http://ine.gob.mx>.
- SANTOS-ZAVALA, J. (2004), *Acción pública organizada: el caso del servicio de agua potable en la zona conurbana de San Luis Potosí*, México, El Colegio de San Luis/Miguel Ángel Porrúa/UAM.
- THE WORLD BANK (2004), *Water resources sector strategy; strategy directions for World Bank engagement*, Washington, DC, The World Bank.

### *Fuentes estadísticas*

- Actividades de Producción de bienes, Censos Económicos 1999, minería y extracción de petróleo. Manufacturas. Electricidad. Captación, tratamiento y suministro de agua, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2000.
- Censos económicos 1999*, materias primas y productos, 1999, Aguascalientes, Ags., 2000.
- Compendio básico del agua 2004*, Gerencia Regional XIII Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Conagua, México.
- Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005*, Sedesol/Conapo/INEGI, México, 2007.
- Estadísticas del agua 2005*, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala Región XIII, Conagua, México.
- Estadísticas del agua en México 2006*, Comisión Nacional del Agua, México.

- “Estadísticas a propósito del Día Mundial del Agua”, *Datos Nacionales*, INEGI, México, marzo de 2007.
- Ley de Aguas Nacionales de México*, México, H. Congreso de la Unión, Cámara de Diputados, Secretaría General, Secretaría de Servicios Parlamentarios, Dirección General de Bibliotecas, Subdirección de Documentación Legislativa.
- “I Censo de captación, tratamiento y suministro de agua”, *Censos económicos 1999*, INEGI, México, 2000.
- XI *Censo general de población y vivienda*, INEGI, México, 1990.
- XII *Censo general de población y vivienda*, INEGI, México, 2000.
- XV *Censo industrial, industrias manufactureras*, INEGI, México, 2000.
- II *Conteo de población y vivienda*, INEGI, México, 2005.
- Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*, Conagua, México, 2001.
- Programa Hidráulico Regional 2002-2006*, Región XIII, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala/Conagua, México, 2003.
- Registro Público de Derechos de Agua, Conagua, Títulos de concesión a enero de 2005.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional de Agua, IV Foro Mundial del Agua, “Situación del subsector agua potable alcantarillado y saneamiento a diciembre del 2004”, Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana, México, 2005.

### *Fuentes electrónicas*

<http://www.planeta.com/ecotravel/mexico/ecologia/97/0897agua2.html>, consultada el 14 de agosto de 2007.

### *Abreviaturas*

hm<sup>3</sup>: hectómetro cúbico

km<sup>2</sup>: kilómetro cuadrado

m<sup>3</sup>: metro cúbico

m<sup>3</sup>/s: metro cúbico por segundo

m<sup>3</sup>/hab/año: metro cúbico por habitante al año

hm<sup>3</sup>/año: hectómetro cúbico al año



## *Organismos operadores en el Distrito Federal y Estado de México: discrepancia en la información económica oficial*

### INTRODUCCIÓN

EN ESTE TRABAJO SE CONTRASTA la situación económica de los organismos operadores de agua potable utilizando procedimientos alternos, con base en información oficial. El primer procedimiento consiste en analizar la estructura económica en escala de organismo operador. Para ello, se utilizan variables como valor de la producción, consumo intermedio y valor agregado bruto, además de dos componentes esenciales de este último: remuneración de asalariados y superávit de operación. El segundo procedimiento examina el flujo de ingresos y egresos de los organismos operadores a escala estatal. Para este propósito, se consideran los organismos operadores en dos grupos geográficos de análisis. El primero es el Distrito Federal (DF), el cual se encuentra bajo la gestión de un solo organismo operador e incorpora 16 delegaciones políticas que integran la entidad. Por otra parte, se seleccionó al Estado de México, el cual comprende un total de 125 municipios (INEGI, 2004). En esta entidad, los organismos operadores corresponden a la división política municipal.

Respecto del primer procedimiento, análisis de la estructura económica, los organismos operadores se subdividen en dos grupos de acuerdo con la cuenta de resultados, es decir, económicamente autosuficientes, o bien, que operan con pérdidas.<sup>1</sup> Posteriormente, se elabora una serie de indicadores económicos para

\* Profesor del Departamento de Economía, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.

<sup>1</sup> Véase el Anexo A.

los organismos operadores autosuficientes, relacionándolos con la población que emplean. Esta parte concluye con la cuenta de resultados económicos que estos últimos arrojan. Por lo que se refiere a organismos deficitarios, se contrastan los gastos de consumo intermedio y de remuneración laboral en tanto insumos, para mostrar su relación con los rubros de valor de la producción bruta y el déficit de operación en el que incurren.

Por lo que toca al segundo procedimiento, se estiman de manera agregada los ingresos y egresos de dichos organismos a escala estatal. El trabajo concluye poniendo de manifiesto las discrepancias entre los resultados de desempeño de la estructura económica, por una parte, y los ingresos netos de los organismos operadores. El presente trabajo se efectuó con información oficial proveniente de la misma fuente (INEGI, 2000).

No obstante la importancia de evaluar el desempeño económico de los organismos operadores de agua potable, existen trabajos sobre la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) que soslayan analizar el resultado económico propiamente dicho. Recurren al expediente de plantear la conveniencia de elevar tarifas con argumentos de racionamiento por parte de las autoridades (Thomson, 2006), o bien, fijar precios de acuerdo con el costo marginal de su abasto y tratamiento (NAP, 1995). Por añadidura, hay estudios que encuentran aumentos en el consumo, pese a que se incrementa la tarifa, si bien de manera inelástica (0.45), según Montesillos (2004). Sin embargo, tanto los planteamientos de racionamiento como los de establecimiento de precios con base en costo marginal de operación, así como la respuesta de los consumidores ante el precio, requieren de antemano conocer el estado económico de dichos organismos. De ahí la relevancia del presente análisis.

## ESTRUCTURA ECONÓMICA

### *Desempeño general*

De acuerdo con la información disponible, la producción bruta de los organismos operadores en el DF fue de 6,042.7 millones de pesos



durante 1998.<sup>2</sup> Dicho monto equivale a 22.2% del total nacional.<sup>3</sup> Por lo que se refiere al Estado de México, dicha producción fue de 2,521 millones de pesos, representando 9.3% del total nacional (cuadro 1).

CUADRO 1  
ORGANISMOS OPERADORES. ESTABLECIMIENTOS,  
PRODUCCIÓN BRUTA, CONSUMO INTERMEDIO  
Y REMUNERACIÓN AL TRABAJO, 1998  
(número, millones de pesos y participación)

	Distrito Federal		Estado de México	
	(número y participación)			
Establecimientos	1	100.0%	117	100.0%
Autosuficientes	1	100.0%	64	54.7%
Deficitarios	–	–	53	45.3%
	(millones de pesos y participación)			
Producción bruta	6,042.7	100.0%	2,521.0	100.0%
Autosuficientes	6,042.7	100.0%	2,287.5	90.7%
Deficitarios	–	–	233.5	9.3%
Consumo intermedio	1,342.4	100.0%	861.4	100.0%
Autosuficientes	1,342.4	100.0%	626.3	72.7%
Deficitarios	–	–	235.2	27.3%
Remuneración laboral	573.4	100.0%	311.2	100.0%
Autosuficientes	573.4	100.0%	231.9	74.5%
Deficitarios	–	–	79.3	25.5%
Superávit de operación	4,126.9	100.0%	1,348.4	100.0%
Autosuficientes	4,126.9	100.0%	1,429.3	106.0%
Deficitarios	–	–	–80.9	–6.0%

Fuente: Estimado con base en datos del INEGI.

Del total de municipios que integran el Estado de México, en cuatro de los mismos no se registra existencia de organismo ope-

<sup>2</sup> Para una definición de producción bruta, así como del resto de conceptos utilizados, véase el Anexo B.

<sup>3</sup> Para dicho año, el valor de la producción bruta a escala nacional fue de 27,167.4 millones de pesos.

rador,<sup>4</sup> y otros tantos se descartaron por presentar información estadística incompleta.<sup>5</sup> En consecuencia, en este trabajo se analiza el desempeño de 117 organismos operadores en este subgrupo.

### Organismos autosuficientes

*Distrito Federal.* Las delegaciones políticas del DF operan bajo un organismo único en el abasto de agua potable, denominado Sistema de Aguas de la Ciudad de México. El primer resultado sobresaliente son los logros económicos del mismo con un superávit de operación de 4,126.9 millones de pesos. Dicho superávit se estimó después de haber cubierto los gastos correspondientes a consumo intermedio y remuneración laboral, que corresponden a poco más de dos terceras partes (68.3%) del valor de la producción bruta. Este monto por demás considerable contrasta con los 1,342.4 millones de pesos destinados a consumo intermedio (22.2% de la producción bruta) y 573.4 millones de pesos de remuneración laboral, con poco menos de la décima parte (9.5%) de la producción bruta. Con base en esta información, la parte mayoritaria del valor de la producción resultaría ser un excedente o remanente económico en el propio DF.

*Estado de México.* De los 117 organismos operadores considerados, 64 correspondientes a poco más de la mitad (54.7%) son autosuficientes. En términos de demanda de materias primas y auxiliares requeridas para el proceso tanto de abastecimiento como de tratamiento de aguas, los organismos autosuficientes absorbieron 626.3 millones de pesos, que representan 72.7% de la demanda de este tipo de insumos dentro de la entidad federativa. Respecto de la remuneración laboral, los organismos autosuficientes destinaron 74.5% del total de pagos a este factor de la producción, equivalente a 231.9 millones de pesos.

Dentro de la entidad, la participación de los organismos autosuficientes tiene un peso abrumadoramente mayoritario en consumo intermedio y en remuneración laboral y, por ende, en cuanto al valor de la producción bruta alcanzada.

<sup>4</sup> Almoloya del Río, Luvianos, San José del Rincón y Tonanitla.

<sup>5</sup> Capulhuac, Chapa de Mota, Chicoloapan y Villa de Allende.

Por lo que se refiere al superávit de operación, los organismos con superávit arrojaron un monto de 1,429.3 millones de pesos, por mucho el rubro de mayor participación dentro de la producción bruta.

### Organismos deficitarios

*Estado de México.* Los 53 organismos deficitarios dentro del Estado de México, si bien numéricamente constituyen 45.3% del total, tienen una participación menor a una décima parte dentro de la producción bruta estatal (9.3%). Del consumo intermedio estatal, absorben poco más de la cuarta parte (27.3%) de la producción bruta, con una participación semejante por lo que se refiere a remuneración laboral (25.5%). El peso de los organismos deficitarios dentro del superávit operacional a escala estatal es de -6%, es decir, su monto deficitario es de poco más de la vigésima parte, comparada con el superávit estatal.

### *Indicadores económicos*

Con el fin de explicitar una serie de peculiaridades en cuanto a las características económicas con las que estos organismos operan, a continuación se relacionan variables fundamentales, como lo son el consumo intermedio, remuneración laboral y la producción bruta, con respecto al personal ocupado (cuadro 2).

### Consumo intermedio

Este rubro incorpora básicamente a las materias primas y auxiliares que fueron requeridas para el abasto y tratamiento de agua potable por los organismos operadores en cuestión. Al relacionar dichas erogaciones con el personal ocupado, se observa un cociente similar entre el DF, y los organismos autosuficientes del Estado de México, con 103.4 y 101.3 miles de pesos por persona ocupada, respectivamente.

### Remuneración laboral

La relación entre remuneración laboral y el personal ocupado arroja el salario anual que en promedio reciben los empleados del

organismo operador. Los organismos autosuficientes en el Estado de México pagaron por trabajador un promedio de 37.5 miles de pesos y los deficitarios 37.4 miles de pesos. En el DF, la remuneración fue de 44.2 miles de pesos por persona ocupada, lo cual implica un monto 15% inferior en el Estado de México. Destaca la similitud en el pago por trabajador en esta última entidad, independientemente del superávit o de déficit con el que opera cada grupo de organismos. Dicho de otro modo, la remuneración media pareciera ser independiente del resultado económico del organismo.

### Producción Bruta

La producción bruta asciende a 465.4 miles de pesos por trabajador en el Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Este monto se reduce a 369.9 mil pesos en los autosuficientes del Estado de México. En consecuencia, la producción bruta por trabajador es 25.8% más alta en el DF, en comparación con los autosuficientes en el Estado de México. En el caso de los organismos operadores que funcionaron con déficit en el Estado de México, la producción bruta arroja 110.1 miles de pesos por trabajador. Dicho monto muestra reducidos niveles relativos de producción bruta, impulsados por el déficit que presentan. Por lo que toca a los deficitarios en el Estado de México, la brecha es sustancial. El DF alcanza una producción bruta 422.7% superior comparada con los organismos deficitarios en el Estado de México.

En consecuencia, mientras que el consumo intermedio por persona ocupada básicamente no presenta diferencias entre el Estado de México y el DF, independientemente de que los organismos sean deficitarios o no, la situación contrasta por lo que toca a remuneración laboral relativa. El pago anual por trabajador es una quinta parte menor en el Estado de México, comparado con el DF. La producción bruta por persona ocupada es 53.3% mayor en el Distrito Federal en relación con el Estado de México.

CUADRO 2  
INDICADORES ECONÓMICOS POR ORGANISMO OPERADOR,  
CONSUMO INTERMEDIO, REMUNERACIÓN LABORAL  
Y PRODUCCIÓN BRUTA CON RESPECTO  
AL PERSONAL OCUPADO, 1998  
(miles de pesos por trabajador)

	<i>Distrito Federal</i>	<i>Estado de México</i>
Consumo intermedio/PO	103.4	103.7
Autosuficientes	103.4	101.3
Deficitarios	—	110.9
Remuneración laboral/PO	44.2	37.5
Autosuficientes	44.2	37.5
Deficitarios	—	37.4
Producción bruta/PO	465.4	303.5
Autosuficientes	465.4	369.9
Deficitarios	—	110.1

Fuente: Estimado con base en datos del INEGI.

### *Estructura de costos y resultados económicos*

A continuación, se presenta el comportamiento de los organismos autosuficientes, es decir, el organismo operador del DF, y en el caso del Estado de México se hace referencia a los 64 organismos que operan con superávit. Posteriormente, se presenta el caso de 53 organismos deficitarios, todos éstos dentro del Estado de México.

#### Organismos autosuficientes

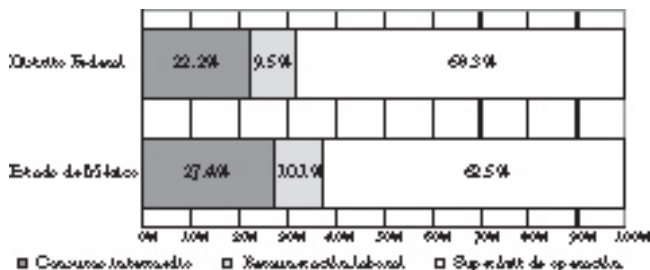
En el DF, una vez cubiertos los costos correspondientes a consumo intermedio (22.2%) y a remuneración laboral (9.5%), el superávit de operación asciende a 68.3% de la producción bruta, que constituye excedentes a disponer por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (gráfica 1). Considerando que en 1988 la depreciación de activos fijos correspondió a 1.23% de la produc-

ción bruta, y la formación de activos de esta naturaleza ascendió a 0.65%, el monto del excedente mencionado permanece sin modificaciones, en lo fundamental. Quedaría de manifiesto una insuficiencia en el monto de inversiones, debido a que el incremento de capital es de aproximadamente la mitad en comparación con el desgaste del mismo. Si la inversión de activos fijos por debajo de su amortización constituye un patrón recurrente, se estaría ante una descapitalización del organismo operador, independientemente de su baja magnitud.<sup>6</sup>

En cuanto al Estado de México, el superávit de operación fue de 62.5%, una vez restado 27.4% de gastos para consumo intermedio y 10.1% en cuanto a remuneración laboral.

Al comparar los grupos antes mencionados, se observa cómo el superávit de operación crece en la medida en que disminuye la participación tanto del consumo intermedio como de la remuneración laboral, es decir, la holgura económica obtenida en cuanto resultados se deriva de la contracción relativa tanto de materias primas y auxiliares, como de la remuneración laboral.

GRÁFICA 1  
ORGANISMOS OPERADORES AUTOSUFICIENTES.  
PRODUCCIÓN BRUTA POR COMPONENTE, 1998  
(porcentaje)



Fuente: Estimado con base en datos del INEGI.

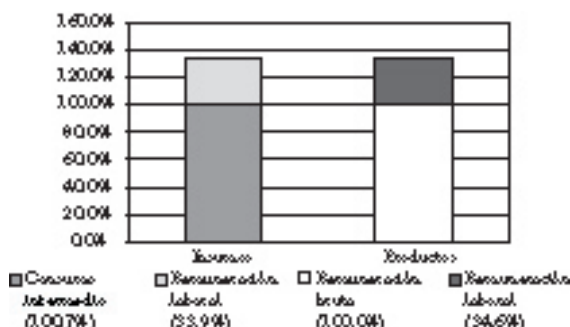
<sup>6</sup>Con estos niveles de inversión, no es evidente cómo se van a subsanar las deficiencias existentes en cuanto a los tres objetivos prioritarios para las autoridades hidráulicas del DF (plantas de tratamiento, mejoría en el drenaje e incremento en el abasto de agua a la Ciudad de México), conforme a Adelson, 2006.

## Organismos deficitarios

En el caso de los organismos deficitarios pertenecientes al Estado de México, el consumo intermedio fue prácticamente equivalente (100.7%) a la producción bruta, es decir, esta última sólo cubrió exclusivamente las erogaciones de materias primas y auxiliares (gráfica 2). Adicionalmente, la remuneración laboral representó 33.9% de dicha producción bruta. La suma de ambas participaciones se elevó a 134.6% con respecto a dicha producción bruta. En consecuencia, los 53 organismos operadores integrados en este grupo requirieron un subsidio o transferencia agregada equivalente a 34.6% por arriba del valor de producción referida.

Dados los datos y la información presentada en este trabajo, se juzga conveniente contrastar esta información con otros elementos de análisis, pues se presenta una perspectiva por demás bonancible, por lo que se refiere a las cuentas económicas antes referidas. De ahí la conveniencia de examinar los flujos de efectivo de dichos organismos, si bien éstos se presentan exclusivamente en el ámbito estatal.

GRÁFICA 2  
ORGANISMOS OPERADORES DEFICITARIOS  
DEL ESTADO DE MÉXICO, 1998  
(% en relación con la producción bruta)



Fuente: Estimado con base en datos del INEGI.

## INGRESO NETO

EN LA presente sección, se examina el desempeño económico de los organismos operadores a partir de un procedimiento alternativo al previamente presentado; se examina la diferencia entre ingreso y egresos a nivel estatal. La diferencia entre ambos constituye el ingreso neto.

*Ingreso*

Por lo que se refiere a ingresos del organismo operador, en el DF ascendieron a 2,448.8 millones de pesos (cuadro 3), más de la mitad (57.1%) de los mismos proviene de las tomas comerciales, mientras que poco más de una cuarta parte (26.9%) se origina en cobros domésticos. La tarifa comercial no registra ingreso alguno en esta entidad. Otros conceptos de ingresos derivados de la actividad, representan 7.9% del total. Éstos incluyen venta de agua tratada y de lodos activados, entre otros.

En el Estado de México, los organismos operadores tuvieron un ingreso agregado de 1,550.1 millones de pesos. De éstos, más de dos quintas partes (43%) provienen de tomas domésticas, en tanto los provenientes de tomas industriales acumulan 9.3%. En dicha entidad, la tarifa comercial aportó 5.5% del total de los ingresos. Una participación de 7.2% la cubre el rubro de otros conceptos derivados de la actividad. Sin embargo, los rubros de multas, recargos y donaciones lograron un porcentaje de 13% en esta entidad, estos últimos englobados en otros conceptos de ingresos no derivados de la actividad. El resto de rubros en ambas entidades refleja proporciones menores al 3 por ciento.

*Egresos*

Dentro de los egresos, la operación misma de los organismos totalizó 3,007.1 y 1,317.7 millones de pesos en el DF y en el Estado de México, respectivamente. Del total de los egresos, el rubro



mayoritario correspondió a los gastos derivados de la actividad económica, el cual fue de 50.5% en el DF y 65.6% en el Estado de México. Dicho concepto cubre los montos de bienes y servicios, excepto los laborales, requeridos en el suministro y tratamiento de agua. La formación neta de capital fijo fue negativa para dicho año en el DF, debido a que la depreciación superó a la formación bruta de capital fijo.<sup>7</sup> En el caso del Estado de México, la inversión neta fue de 75.9 millones de pesos.<sup>8</sup> Por otra parte, la construcción interna de activos para uso propio alcanzó 4.6% en esta última entidad.

CUADRO 3  
INGRESOS Y EGRESOS POR ORGANISMOS OPERADORES  
POR ENTIDAD FEDERATIVA, 1998  
(millones de pesos y porcentaje)

	<i>Distrito Federal</i>		<i>Estado de México</i>	
Ingresos	2,448.8	100.0%	1,550.1	100.0%
Derivados de la actividad				
Tipo de toma				
Doméstica	658.3	26.9%	666.5	43.0%
Comercial	1,396.8	57.0%	84.7	5.5%
Industrial			144.8	9.3%
Servicios públicos	1.5	0.1%	3.6	0.2%
Ejercicios anteriores			37.4	2.4%
Otros conceptos	194.3	7.9%	112.2	7.2%
No derivados de la actividad				
Otros conceptos	0.2	0.0%	55.0	3.5%
Otros conceptos	195.8	8.0%	202.2	13.0%
Venta de activos fijos	1.9	0.1%	0.05	n.s.
Subsidios	—	—	243.7	15.7%
Egresos	3,007.1	100.0%	1,317.7	100.0%
Gastos derivados de la actividad	1,520.0	50.5%	863.8	65.6%
Remuneraciones laborales	573.4	19.1%	310.9	23.6%
Variación de existencias	947.0	31.5%	5.9	0.4%

<sup>7</sup> En dicho año, la depreciación de capital fue de 74.6 millones de pesos, mientras que la formación bruta fue de 41.2.

<sup>8</sup> Con 97.4 millones de pesos de inversión bruta, la depreciación alcanzó 21.5.

CUADRO 3 (*Continuación*)

	<i>Distrito Federal</i>		<i>Estado de México</i>	
Formación neta de capital	-33.4	-1.1%	75.9	5.8%
Gastos no derivados de la actividad				
Pago de intereses			0.01	n.s.
Otros conceptos				
Activos fijos producidos para uso propio			60.4	4.6%
Impuestos indirectos			0.6	n.s.
Ingresos-egresos	-558.2		232.4	
% (saldo/ingreso)	-22.8%		15.0%	

Nota: n.s.: No significativo.

Fuente: INEGI, 2000.

Las remuneraciones laborales constituyen el segundo rubro de egresos, los cuales representaron 19.1 y 23.6% en el DF y en el Estado de México, respectivamente. En el caso del DF, destaca el alto nivel de variación de existencias, que representa 31.5% del valor de los egresos. A primera vista, no se comprende cómo se puede incrementar en tal proporción la cantidad de insumos en vías de utilización. Este nivel de variación de existencias contrasta con 0.4% en el Estado de México, que refleja un manejo de inventarios normal ante un periodo de baja inflación en la última entidad mencionada. El resto de rubros son por demás modestos, con una participación menor a 3 por ciento.

### *Ingreso neto de egresos*

En el DF, los ingresos alcanzaron 2,448.8 millones de pesos, mientras que los egresos fueron de 3,007.1. En consecuencia, hay un déficit de 560.3 millones de pesos, que representan 22.9% en relación con los primeros.

En el Estado de México, mientras que los ingresos fueron de 1,550.1 millones de pesos, los egresos alcanzaron 1,317.7. Aquí se observa un superávit de 232.4 millones de pesos, equivalentes a 15% de los ingresos mismos.

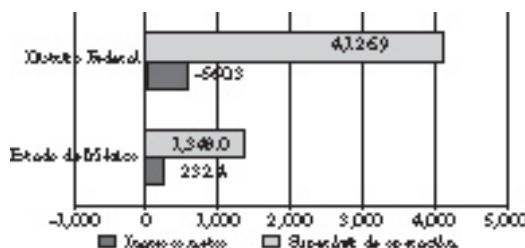
### SUPERÁVIT DE OPERACIÓN E INGRESO NETO: DISCREPANCIA

QUEDA de manifiesto la considerable discrepancia con base en la información oficial. Al analizar las variables económicas presentadas en forma de cuenta de producción, el DF presenta un superávit de operación de 4,126.9 millones de pesos (gráfica 3). Sin embargo, al analizar la diferencia entre ingresos y egresos de dicho organismo, se estima un ingreso neto negativo de 560.3 millones de pesos.

Por lo que se refiere al Estado de México, presenta un superávit de operación de 1,348.4 millones de pesos, de acuerdo con los datos de producción. Sin embargo, al estimar los ingresos y egresos de los organismos de dicha entidad, se alcanza un ingreso neto positivo de 232.4 millones de pesos.

Desde esta perspectiva, el superávit de operación no está sustentado por el flujo de ingresos y egresos que dichos organismos presentan. La discrepancia resultante de estimar la situación económica de los organismos en ambas entidades cuestiona la coherencia de dichos datos. Existe la reserva de que el superávit de operación ha sido sobreestimado, sin fundamento aparente. Esta deducción se deriva de compulsar los niveles de ingresos y egresos, con la propia estructura económica.

GRÁFICA 3  
ORGANISMOS OPERADORES.  
SUPERÁVIT DE OPERACIÓN E INGRESOS NETOS, 1988  
(millones de pesos)



Fuente: Estimado con base en datos del INEGI.

## CONCLUSIONES

LOS RESULTADOS presentados en este capítulo se basan en el *Primer Censo de captación, tratamiento y suministro de agua*. A partir de dicho censo, se analiza el comportamiento económico mediante dos procedimientos. El primero examina la estructura económica, y el segundo los ingresos netos.

Por lo que se refiere a la estructura económica, la producción bruta del único organismo operador en el DF fue de 6,042.7 millones de pesos en 1998. Este monto es 2.4 veces superior al de la producción bruta del agregado de 117 organismos en el Estado de México (2,521 millones de pesos) en el mismo año. La mayoría (54.7%) de los organismos operadores en el Estado de México funcionan con superávit y participan con 90.7% de la producción bruta. Si bien el resto (45.3%) de los organismos operan con déficit, éstos aportaron menos de la décima parte (9.3%) de la producción bruta.

Al considerar indicadores relativos, el consumo intermedio por trabajador muestra una homogeneidad conspicua. En otras palabras, las materias primas y auxiliares consumidas por trabajador promediaron 103.4 mil pesos en el DF. En el Estado de México, fueron de 101.3 y de 110.9 miles de pesos, en los casos de organismos con superávit y déficit, respectivamente. Por lo que se refiere a remuneración media, el DF promedió 44.2 miles de pesos por trabajador, mientras que en el Estado de México fue cerca de 15% menos, independientemente de la naturaleza de déficit o superávit con la que opere el organismo.

En escala de entidad federativa y considerando los organismos autosuficientes, el superávit de operación presenta cifras extraordinariamente elevadas. Dicho superávit se refiere al remanente una vez cubierto el consumo intermedio y las remuneraciones laborales. Por ejemplo, de cada peso producido, 68.3% corresponde a dicho superávit en el DF y 62.5% en el Estado de México. Desde esta perspectiva, más de tres quintas partes del producto corresponderían a este rubro, con lo cual la holgura económica mostrada sería extraordinaria. En el caso de los organismos deficitarios del Estado de México, el déficit que presentan

es equiparable con la nómina salarial, es decir, el valor de la producción cubre los insumos intermedios utilizados.

Un segundo procedimiento analiza detalladamente los ingresos y los egresos de los organismos en ambas entidades federativas, para arribar al ingreso neto. A este respecto, el DF obtuvo un nivel de ingresos de 2,448.8 millones de pesos, y erogaciones totales por 3,007.1 millones de pesos en 1998. En consecuencia, operó con un déficit de 560.3 millones de pesos. Los ingresos referidos contrastan con el valor de la producción previamente consignado, de 6,042.7 millones de pesos en el mismo año. Dicho de otra manera, lo que desde el procedimiento de estructura económica arroja un superávit de 4,126.9 millones de pesos, en términos netos de entradas y salidas de dicho organismo deviene en un ingreso neto negativo de 560.3 millones de pesos.

En el caso del Estado de México, los organismos operadores logran acumular ingresos por 1,550.1 millones de pesos. Ante erogaciones de 1,317.7 millones de pesos en 1998, la operación agregada arroja un ingreso neto positivo de 232.4 millones de pesos. Sin embargo, al contrastar estos datos con la producción bruta para la entidad en cuestión, se consigna una producción bruta de 2,521 millones de pesos. En consecuencia, mientras que bajo el procedimiento de estructura económica se presenta un superávit de operación de 1,348.4 millones de pesos, al consignar el ingreso neto, éste se reduce a 232.4 millones de pesos.

En el DF, el superávit de operación desaparece, para convertirse en un sustancial déficit. En el Estado de México, dicho superávit se desploma. Lo anterior es muestra ostensible de discrepancia entre ambos procedimientos para la entidad en cuestión, no obstante provienen de la misma fuente censal. Aparentemente, dicho superávit pareciera haber sido sobreestimado, sin fundamento correspondiente.

## ANEXO A. METODOLOGÍA

### *Primer procedimiento. Estructura económica*

Con base en INEGI (2000), donde se registran datos referidos a activos fijos netos de depreciación, consumo intermedio, forma-

ción bruta de capital fijo, personal ocupado, producción bruta, remuneración de asalariados y valor agregado censal bruto para 2,319 organismos operadores. Los costos totales se integraron por la suma de consumo intermedio y remuneración de asalariados. El superávit de operación se estimó como la diferencia entre valor agregado censal bruto y remuneración de asalariados. La autosuficiencia o déficit con que opera un organismo se determina por la producción bruta menos el costo total.

### *Segundo procedimiento. Ingreso neto*

Se estiman los ingresos de los organismos operadores con base en INEGI 2000, es decir, aquellos derivados de la actividad propia, constituidos por los diversos cobros por tipo de toma, tanto del periodo actual como de los previos. Asimismo, se incluyen ingresos no derivados de la actividad, como lo son venta de agua tratada y lodos activados. Adicionalmente, se incorporan ingresos derivados de donaciones, multas y rezagos. Por otra parte, se registra la venta de activos fijos, así como los subsidios recibidos.

En cuanto a egresos, se registran los gastos derivados de la actividad, así como remuneraciones laborales, compras de activos fijos, variación de existencias y depreciación de activos fijos. Por otra parte, se incluyen los gastos no derivados de la actividad, como los activos fijos producidos para uso propio, así como impuestos indirectos netos de subsidios. El ingreso neto está constituido por los ingresos una vez deducidos los egresos.

## ANEXO B. GLOSARIO DE TÉRMINOS<sup>9</sup>

*Activos fijos.* Constituyen el valor de todos los bienes muebles e inmuebles que intervienen directa o indirectamente en el proceso de producción, y cuya vida útil es superior a un año. Incluye los activos fijos propiedad del organismo operador, arrendados a terceros, así como los utilizados bajo esquemas de arrendamiento financiero.

<sup>9</sup> El presente glosario se basa, con modificaciones, en INEGI (2000).

*Consumo intermedio.* Se refiere al monto de los bienes y servicios consumidos, tanto materias primas como auxiliares, por parte del organismo operador, para el desarrollo de su actividad fundamental. Por ejemplo, materiales para la prestación de servicios, compra de agua en bloque, combustibles y lubricantes, energía eléctrica, alquiler de equipo de trabajo y otros bienes muebles e inmuebles; viáticos y pasajes; servicios de comunicación; comisiones y honorarios; publicidad; agentes físico-químicos, reactivos e insumos similares, servicios profesionales proporcionados por terceros; intendencias, jardinería y pagos a terceros; pagos a terceros por servicios de reparación y mantenimiento corriente, gastos para la producción y reparación de activos fijos para uso propio.

*Costo total.* Está integrado por el consumo intermedio y la remuneración de asalariados.

*Impuestos indirectos.* Son obtenidos como un recargo a los productos o servicios proporcionados por el organismo operador.

*Ingresos de ejercicios anteriores.* Monto recabado por el organismo operador por adeudos anteriores al año de referencia.

*Ingresos por toma comercial.* Son los que el organismo operador recaba por concepto de toma comercial, que son las conexiones de agua potable destinada para uso de alguna actividad comercial o de servicios, como es el caso de lavanderías, centros comerciales, restaurantes, etcétera.

*Ingresos por toma de servicios públicos.* Recabados por el organismo operador por concepto de toma de dependencias públicas, como lo son las oficinas de gobierno, escuelas, parques y jardines, entre otros.

*Ingresos por toma doméstica.* El organismo operador los recaba por concepto de toma doméstica, que son las conexiones de agua potable que abastecen a las viviendas y están destinadas al uso particular de las personas, riego de jardines, árboles de ornato, etcétera.

*Ingresos por toma industrial.* El organismo operador los recaba por concepto de toma industrial, siendo ésta la que cuenta con un mayor diámetro en la tubería, por la cantidad de agua que conduce y su uso varía según el tipo de actividad de la empresa, puede ser empleada como materia prima, material auxiliar o para uso corriente.

*Otros conceptos de ingresos derivados de la actividad.* Son los ingresos que el organismo operador recibe por conceptos que no fueron considerados de manera explícita, como venta de agua tratada, venta de lodos activados, renta de equipo de medición, pitometría, etcétera.

*Otros conceptos de ingresos no derivados de la actividad.* Son los recibidos por el organismo operador por otros conceptos ajenos a su actividad productiva, que no fueron considerados de manera explícita, por ejemplo: donaciones, multas y recargos. Este rubro excluye financiamiento recibido y venta de activos fijos.

*Organismo operador.* Unidad económica que administra y opera el sistema de agua potable, alcantarillado y saneamiento, dotando estos servicios a habitantes de uno o varios municipios. La denominación legal puede ser sistema de agua, dirección, comisión, junta local, departamento, comité. La participación privada, la cual toma la forma de concesión de un servicio público otorgado por parte del poder municipal o estatal, puede ser parcial, para cubrir actividades como lo son medición, facturación y cobro. Alternativamente, pueden abarcar todas las actividades del propio organismo.

*Producción bruta total.* Se refiere al valor del agua suministrada por el organismo operador, aunado a los ingresos por derechos de conexión de tomas, alcantarillado, saneamiento, venta de agua tratada y otros ingresos derivados de esta actividad, incluyendo los activos fijos producidos por el organismo para uso propio.

*Remuneraciones laborales.* Están integradas por todos los pagos en forma de sueldos y salarios que efectúa cada organismo operador, así como las prestaciones sociales e indemnizaciones correspondientes.

*Subsidios.* Son los ingresos recibidos por el organismo operador provenientes de los diferentes niveles de gobierno, ya sea federal, estatal o municipal, sean monetarios o en especie, destinados a sufragar los gastos corrientes de operación. Este rubro excluye donaciones.

*Superávit de operación.* Resultado de restar al valor agregado la remuneración laboral. Asimismo, se obtiene de restar el consumo



intermedio y la remuneración laboral a la producción bruta. El presente superávit se integra por la depreciación de capital fijo, el pago de intereses sobre préstamos y un residual denominado “otros conceptos”.

*Valor agregado.* Es el valor integrado por la remuneración laboral y el superávit de operación. Alternativamente, es la diferencia entre producción bruta total y consumo intermedio. Incluye depreciación de activos fijos netos.

*Variación de existencias.* Es el valor que resulta de restar el inventario final del inventario inicial.

## BIBLIOGRAFÍA

- ADELSON, N. (2006), *Water woes. Private investment plugs leaks in water sector*, Mexico Connect [www.mexconnect.com.mex\\_/travel/bzm/bzmwaterwoes.html](http://www.mexconnect.com.mex_/travel/bzm/bzmwaterwoes.html)
- GDF (s/f), *Desarrollo sustentable de la Ciudad de México y su Área Metropolitana*, México. [www.obras.df.gob.mx/desarrollo/index.html](http://www.obras.df.gob.mx/desarrollo/index.html)
- INEGI (2000), *I Censo de captación, tratamiento y suministro de agua*, Censos Económicos 1999, Aguascalientes.
- (2004), *Anuario Estadístico del Estado de México*, Aguascalientes.
- MONTESILLOS, C.J.L. (2004), “Estructura tarifaria. Análisis económico de la estructura tarifaria del servicio de agua potable en el Distrito Federal”, en O.M.C. Martínez *et al.*, *Gestión del agua en el Distrito Federal. Retos y propuestas*, México, UNAM y Asamblea Legislativa del DF, pp. 101-149.
- NAP (2005), *Mexico City's water supply: improving the outlook for sustainability*, Washington, National Academy Press, National Research Council, Academia Nacional de la Investigación Científica y Academia Nacional de Ingeniería.
- THOMSON, A. (2006), “Raging Thirst Gives Mexicans that Sinking Feeling”, *Financial Times*, 16 de marzo.



GRACIELA CARRILLO GONZÁLEZ\*

E ISABEL QUINTAS PEREIRA\*\*

## *El consumo de agua en la agricultura de la Zona Metropolitana del Valle de México*

### INTRODUCCIÓN

EL PROBLEMA DE LA disponibilidad de agua para satisfacer las necesidades básicas de la sociedad se agudiza cada vez más debido al incremento de la población y a los niveles de contaminación que se presentan por la mala disposición de las aguas residuales derivadas de muy distintos usos.

En muchas regiones áridas y semiáridas del mundo, dedicadas a la agricultura o aquellas donde se concentran grandes centros urbanos, la disponibilidad de agua se ha convertido en un asunto crítico y ello ha obligado a la construcción y frecuente utilización de indicadores de eficiencia, así como a la búsqueda de tecnologías, procesos y sistemas que permitan optimizar el uso que se da a este recurso.

Uno de estos indicadores, utilizado principalmente en la agricultura, es el de la productividad del agua. Esto último permite no sólo liberar agua para el consumo humano, sino para el mantenimiento de la vida y los servicios de los sistemas ecológicos.

Los cálculos de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) indican que el incremento de 1% en la productividad del agua agrícola liberaría 24 litros de agua diaria para cada habitante del planeta (FAO, 2006), y un aumento de 40% en dicha productividad, que podría alcanzarse

\* Profesora-investigadora del Departamento de Producción Económica. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco.

\*\* Profesora-investigadora del Departamento de Producción Económica. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco.

a partir de mejoras tecnológicas, reduciría la necesidad de perforar pozos adicionales en los próximos 25 años. Sin embargo, el ahorro de agua en este sector depende casi totalmente del tipo de sistema de riego que se utiliza, siendo el riego por gravedad el que más desperdicio genera y el que más se usa en la mayoría de los distritos de riego en México.

En este trabajo nos interesa analizar los factores que han incidido para que la administración del recurso dentro de los distritos de riego del país y en particular dentro de los distritos de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM),<sup>1</sup> misma que se *empalma*, conforme a la división administrativa de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), con el Distrito XIII, Aguas del Valle de México, lo que deriva en patrones de uso del agua poco eficientes.

#### DISTRIBUCIÓN DEL AGUA DE RIEGO EN EL SECTOR AGRÍCOLA

EN México se tiene una precipitación anual de 750 mm en promedio, de la cual se evaporan dos terceras partes, aprovechándose el resto para su uso urbano, agrícola, industrial y un cuarto uso nunca contabilizado, el ecológico. El volumen de agua aprovechado actualmente se destina en 77% para uso agropecuario, 10% para uso urbano y 13% para uso industrial. A esto hay que agregar una proporción aproximada de 145 km<sup>3</sup> para usos no consuntivos –generación hidroeléctrica.

Estos números parecen indicar que aún se tienen importantes excedentes de agua, sin embargo, no es así; más de 30% de la precipitación ocurre en el sureste del país, donde la densidad poblacional es baja, y debido al clima subtropical a tropical húmedo, las condiciones no son adecuadas para el cultivo de granos. Las zonas aptas para la agricultura se encuentran en la región central,

<sup>1</sup> Aun cuando esta zona no se ubica entre las más importantes del país por su nivel de consumo de agua para riego, es relevante debido a que queda inmersa dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, que es una de las mayores concentraciones urbanas del mundo.

con escasos 700 mm de precipitación anual y en la zona árida del norte, donde se llega a precipitaciones de tan sólo 200 a 300 mm anuales, lo que hace indispensable contar con sistemas de riego.

La superficie que se destina en el país a las labores agrícolas oscila entre los 20 y 25 millones de hectáreas con una superficie cosechada que va de 18 a 22 millones de hectáreas por año. El valor estimado de la producción agrícola calculado a precios constantes de 1993 fue de entre 70,000 y 80,000 millones de pesos anuales durante la década de 1990, lo cual representó alrededor de 6% del PIB nacional. Durante esos años, la población ocupada en el sector fue de alrededor de 8.6 millones de personas.

Hay grandes diferencias en la productividad agrícola; en las áreas de agricultura de riego es 3.6 veces mayor que en las de temporal, por tanto, la agricultura de riego representa más de 50% de la producción agrícola nacional. En México, la superficie con infraestructura de riego es de 6.3 millones de hectáreas; 54% de esa superficie está inscrita en 84 Distritos de Riego y 46% restante es manejado por cerca de 40,000 unidades de riego, que son pequeñas obras de irrigación operadas y mantenidas por los propios productores sin intervención de instituciones públicas.

En la mayoría de los estudios se coincide en que la agricultura de riego utiliza cerca de 78% del agua que se consume en el país, lo cual atribuye una gran responsabilidad a este sector frente al riesgo de escasez de agua en México. Los métodos aplicados son tradicionales en más de 80% de la superficie y la eficiencia promedio nacional en el uso del agua se estima entre 40 y 46%. La Conagua ha señalado que con el empleo de tecnologías e infraestructura avanzadas podría alcanzarse hasta 60% de eficiencia, lo que permitiría liberar importantes volúmenes de agua para otros usos en diversas regiones.

En particular, el punto que destaca en el análisis está asociado a la escasez relativa que se presenta en el país y que repercute en esta actividad productiva. Varios aspectos determinan tal situación, como las diferencias que existen entre regiones para captar aguas superficiales, de modo que las regiones con menor capacidad de captación son las que presentan una demanda su-

perior para uso agrícola –zonas áridas y semiáridas–, de tal suerte que son las regiones noroeste y pacífico norte, donde la precipitación anual es muy baja, las que tienen los mayores volúmenes de agua concesionados para uso agropecuario, en tanto que en las regiones frontera sur, golfo centro y pacífico sur con mayor precipitación pluvial, el volumen concesionado es mucho menor, mientras que las regiones del centro y norte, al tener las mayores superficies de cultivo, requieren también de volúmenes importantes de agua concesionada, ya que su nivel de precipitación es relativamente bajo (cuadro 1).

También han surgido otros problemas como resultado de la baja precipitación en regiones de alta demanda, donde se hace un uso intensivo de las aguas subterráneas (mapa 1), lo que implica la disminución en el nivel de los mantos freáticos; a ello se suma la tendencia a una recarga cada vez menor de los mismos, por la disminución de los niveles de precipitación que se asocian a fenómenos como la deforestación, la erosión de los suelos y las alteraciones climáticas.

Otro aspecto fundamental son las características de los sistemas de riego predominantes, los cuales observan un importante nivel de rezago, en relación con la agricultura moderna de otros países e incluso con algunas zonas tecnificadas del país. Esto provoca un uso muy ineficiente del agua y por tanto, se genera gran desperdicio que deriva en una eficiencia promedio de la actividad agrícola nacional de 40 por ciento.<sup>2</sup>

#### EFICIENCIA EN LOS SISTEMAS DE RIEGO Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA

EN MÉXICO, los sistemas de riego más conocidos son: por gravedad, por aspersión y por goteo. Cada uno presenta ventajas y desventajas con respecto a los otros. Para los agricultores es bien conocido

<sup>2</sup> Este porcentaje fue calculado por la Conagua a partir del registro de datos en lo referente a conducción del agua de las obras primarias hasta la parcela de cultivo, sin embargo, los mismos ingenieros de la comisión señalan que se carece de datos para calcular la eficiencia en la distribución del agua dentro de la parcela, donde se cree que la pérdida es aún mayor.

CUADRO I  
VOLUMEN DE CAPTACIÓN DE AGUA. SECTOR AGROPECUARIO

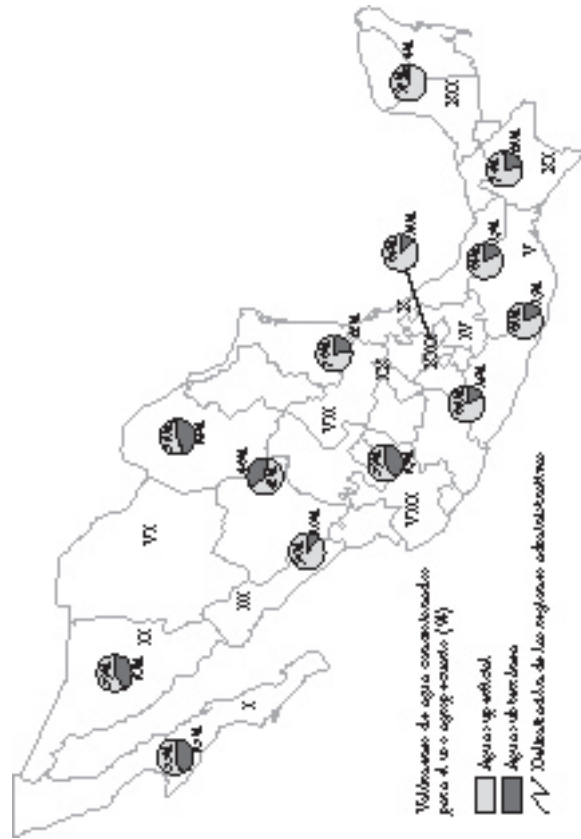
Regiones administrativas	Precipitación media anual (mm) (1941-2002)	Superficie cultivada (miles ha)	Volumen en concesión (hm³)		Volumen sector agropecuario (hm³)		Agua superficial (hm³)		Origen	
I Península de Baja California	198	246.9	3,780		3,083		1,702		55.2	1,381
II Noroeste	462	502.2	6,351		5,446		3,197		58.7	2,249
III Pacífico Norte	765	815.2	10,386		9,842		8,889		90.3	953
IV Balsas	965	202.1	10,160		6,029		5,052		83.8	977
V Pacífico Sur	1,300	74.7	1,350		1,075		876		81.4	199
VI Río Bravo	408	550.6	7,642		6,689		3,627		54.2	3,062
VII Cuencas Centrales del Norte	389	116.6	3,639		3,174		1,204		37.9	1,970
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	853	452.1	12,804		10,565		6,276		59.4	4,289
IX Golfo Norte	813	265.6	3,990		3,373		2,623		77.8	750
X Golfo Centro	1,902	36	4,535		2,132		1,774		83.2	358
XI Frontera Sur	2,264	36.5	1,944		1,434		1,087		75.8	347
XII Península de Yucatán	1,153	56.7	1,601		988		28		2.8	960
XIII Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala	730	94.3	4,461		2,240		1,924		85.9	316
Total nacional	771	3,449.5	73,643		56,070		38,259		68.2	17,811
										31.8

Nota: Precipitación 100.0%  
Evapotranspiración 71.8%  
Escorrentimiento sup. 23.1%  
Recarga de acuíferos 5.1%  
Fuente: Elaboración propia.

# MAPA I

## AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA EN MÉXICO

Volúmenes concesionados de agua superficial y de agua subterránea para el uso agropecuario  
(cifras acumuladas a diciembre de 2002) (%)



Fuente: Gerencia del Registro Público de Derechos de Agua SGAA, CNA.



que en la selección de un sistema de riego deben considerarse factores como tipo de suelo, topografía del terreno, fuente de abastecimiento de agua, calidad del agua, distancia de la fuente de agua al cultivo, potencia requerida, disponibilidad de mano de obra y costo del sistema de riego, sin embargo, suele predominar este último criterio, lo cual lleva a que en el país los sistemas de riego por gravedad se utilicen en 90% de la superficie, a pesar de que su eficiencia es inferior a la de los otros, debido a las pérdidas de agua por infiltración profunda y escurrimiento superficial.

Esta condición técnica en las parcelas de los Distritos de Riego en México determina la baja productividad del agua para uso agrícola toda vez que dicha productividad depende de los métodos de cultivo utilizados en el país y en todo el mundo. Un ejemplo documentado por la FAO es la variación de la productividad del trigo y del arroz en el planeta, que es de 0.5 kg/m<sup>3</sup> en los sistemas de riego primitivos, y de 2 kg/m<sup>3</sup> con irrigación altamente eficiente, tanto en Asia como en Europa. En el caso de Estados Unidos, estos mismos rendimientos se obtienen con sistemas de agua de lluvia y prácticas tecnológicas, mientras que en África Subsahariana se logran apenas 0.2 kg/m<sup>3</sup>.

La FAO (2006) considera que, de 1961 a 2000, el rendimiento del cultivo de arroz se duplicó y el del trigo se incrementó en 160% debido a la selección de variedades y al empleo de técnicas más eficientes de riego que disminuyen las pérdidas por evaporación o percolación y hacen un uso más eficiente del agua de lluvia y del agua almacenada.

Actualmente existe una discusión entre dos propuestas diametralmente opuestas: por un lado, quienes piensan que se debe invertir en pequeñas mejoras para aumentar la producción de los grupos más pobres que producen maíz de temporal para el autoconsumo, esto es, cosechando agua a muy pequeña escala para realizar un riego suplementario de 100 mm entre lluvias y elevar el rendimiento de 1 a 2 ton/ha; y por otro, la corriente que señala a la agricultura de temporal como inviable, ya que depende del clima, y propone que se invierta en alta tecnología de riego y almacenaje a mediana escala.

## LOS ESQUEMAS DE GESTIÓN DEL AGUA

LA CONAGUA, creada en 1989 en la idea de concentrar las acciones relacionadas con el agua en un organismo autónomo técnica y administrativamente, para fines de planeación dividió al país en 13 regiones administrativas. En cada una quedan incorporados uno o más de los 84 distritos de riego, varias unidades de riego y una o varias entidades federativas o parte de éstas (cuadro 2).

La Región XIII, cuya influencia territorial se cruza o interseca con el Valle de México, ha sido catalogada por la propia Conagua como una zona donde prevalece la sobreexplotación de los acuíferos. Asimismo, la Región VIII, que comprende la zona centro-occidente del país, abarca una pequeña parte del Valle de México.

Se estima que en la subregión del Valle de México, se presenta una extracción total que excede en 140% la magnitud de la recarga. Como consecuencia de la extracción excesiva de agua de los acuíferos, se producen fuertes asentamientos en algunas zonas. Asimismo, se presenta un suministro y uso ineficiente de agua para fines agrícolas, debido a que el crecimiento de las zonas agrícolas ha rebasado la capacidad de abastecimiento. Según los datos estadísticos, en este distrito se riega con una eficiencia de apenas 35%; asociado a esto, el riego parcelario es ineficiente, hay inundaciones frecuentes en los campos de cultivo debido al riego por gravedad, no hay nivelación de los terrenos y no existe tecnificación en el riego. Para fines de operación, administración y mantenimiento del recurso hídrico, la gestión se da a través de dos tipos de organizaciones, los cuatro distritos de riego que abarca y las más de 70 unidades de riego estimadas.

Para tratar de medir la productividad de la agricultura con riego en kilogramos producidos por metro cúbico de agua y en pesos producidos por metro cúbico de agua, se analizan los datos del distrito de riego 087, Rosario-Mezquite, que pertenece a la Región administrativa VIII y está localizado en la Cuenca del Lerma-Santiago. Se trata de uno de los distritos más grandes de la cuenca,

CUADRO 2

REGIONES ADMINISTRATIVAS. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

<i>Regiones administrativas</i>	<i>Extensión territorial (km<sup>2</sup>)</i>	<i>Unidades de riego* (número)</i>	<i>Distritos de riego</i>	<i>Entidades federativas</i>
I. Península de Baja California	145,500	1,930	014-066	B.C.N., B.C.S y Son.
II. Noroeste	205,300	1,070	018-037-038-041-051-083-084	Son. y Chih.
III. Pacífico Norte	151,900	1,359	010-043-052-063-074-075-076-108-109-111	Sin., Nay. y Dgo.
IV. Balsas	119,200	4,076	016-030-045-056-057-068-097-098-099	Mor., Pue., Tlax., Mich. y Gro.
V. Pacífico Sur	77,100	69	019-095-104-105-110	Oax. y Gro.
VI. Río Bravo	379,600	4,530	004-005-006-009-025-026-031-042-050-089-090-103	Coah., N. León, Chih. y Tamps.
VII. Cuencas Centrales del Norte	202,400	6,641	1	Coah. y Dgo.
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	190,400	12,310	001-011-013-020-024-033-034-053-061-085-087-093-094	Ags., Jal., Mich., Col., Zac., Gto. y Méx.
IX. Golfo Norte	197,900	2,591	002-008-023-028-029-044-049-060-086-092-096	Tamps., Hgo., Qro., S.L.P., Ver., y Méx.
X. Golfo Centro	104,600	1,251	035-082	Ver.
XI. Frontera Sur	101,800	71	046-059-101-107	Chis.
XII. Península de Yucatán	137,800	1,594	081-102	Camp. y Q. Roo
XIII. V. de México y S. Cutzamala	16,400	73	003-073-088-100-112	Hgo. y Edo. de Méx.

\*Número de U.R. a diciembre de 1998, CNA.  
Fuente: CNA.

con 63,000 hectáreas; consume una parte importante del caudal del río, que en la época de estiaje prácticamente no llega a la laguna de Chapala, además funge como drenaje natural de la cuenca y por lo tanto, está expuesto a la contaminación con agroquímicos residuales.

En este distrito se obtienen dos cosechas, la de primavera-verano, con muy poco riego, aprovechando las lluvias, y la de otoño-invierno, basada exclusivamente en el riego. Los índices varían dependiendo de la precipitación de la temporada y del tipo de cultivo. Las 63,000 ha de cultivo pertenecen a 16,035 usuarios, en promedio 4 ha/usuario. La precipitación media anual en la región es de 750 mm, y tienen autorizado un volumen máximo de 240 millones de metros cúbicos.<sup>3</sup> Los cultivos principales dependen de la temporada: en el ciclo primavera-verano se siembra maíz y sorgo para grano, con un riego inicial, si las lluvias no empiezan temprano, lo que permite utilizar láminas de menos de 25 y 30 cm para estos productos. En el ciclo otoño-invierno se siembra especialmente trigo, cebada y garbanzo, a los que se aplican láminas de 65, 60 y 55 cm.

Estas prácticas de riego implican la utilización de menos de 2,500 m<sup>3</sup>/ha en el ciclo de verano y 6,000 m<sup>3</sup>/ha en el ciclo de otoño-invierno. Los rendimientos obtenidos en el distrito van de 6 a 8 ton/ha, lo que lleva a estimar una productividad de 3 kg/m<sup>3</sup> (cuadro 3) para el maíz, que parece extraordinario ante los valores internacionales, porque no se considera la lluvia y solamente se contabiliza el agua entregada por el sistema de riego. A los precios del 2006, que oscilaron entre 1,200 y 1,500 pesos por tonelada, se obtienen 4.5 pesos por metro cúbico, aunque posiblemente los costos de producción, semillas, fertilizantes y otros, equivalen al 50 por ciento.

En el ciclo de invierno, los campesinos deben realizar tres o cuatro riegos, que pagan al distrito de riego a razón de 250 pesos por hectárea, por lo que su utilidad disminuye y se ven obligados a sembrar productos de mayor valor y mayor rendimiento por

<sup>3</sup> La asignación se determina anualmente dependiendo de los niveles de las presas.

CUADRO 3  
RENDIMIENTO EN EL CULTIVO DE TRIGO (D-087)

<i>Cultivo</i>	<i>Rendimiento ton/ha</i>	<i>Riego cm</i>	<i>Prod. kg/m<sup>3</sup></i>	<i>Precio/ton 1998-2002</i>	<i>Rendimiento \$/m<sup>3</sup></i>
Maíz P-V y O-I	7	23	3.0	1,300	4.0 a 1.5
Sorgo P-V	8.5	22	3.8	1,250	4.5
Trigo O-I	8	48	1.6	1,300	2.0
Cebada O-I	6	40	1.5	1,450	2.2
Garbanzo O-I	2	25	0.8	4,400	3.5
Frijol O-I	2	SD		3,500	–
Avena forrajera O-I	22	SD		452	–

Fuente: Elaboración propia.

hectárea. En el caso del trigo, la producción por metro cúbico de agua disminuye a menos de la mitad.

Aunque los rendimientos en kg/ha son de los más altos del país, la baja productividad del agua se debe, como en muchos distritos, a la baja eficiencia de conducción de los sistemas de riego, al limitado uso de sistemas modernos de riego, a la falta de una práctica de medición sistemática, así como al bajo precio del agua, que en el caso de la agricultura, permite además un consumo mínimo sin costo. Otro problema son los tipos de cultivos que se producen y que consumen demasiada agua.

El distrito 087 tiene una asignación máxima de 240 millones de metros cúbicos (que se rectifica año con año de acuerdo con la disponibilidad de las presas) para 63,000 hectáreas, lo que equivale a una lámina de casi 40 cm, a los que se suman los 75 cm de lluvia anual. Solamente con un uso eficiente y con cultivos apropiados se podrían obtener las dos cosechas en toda la superficie. Sin embargo, parte del volumen asignado corresponde a pozos, lo que implica un fuerte gasto en energía, por lo que actualmente algunos productores de las unidades a las que les corresponde agua de pozos están comprando los derechos de agua de las unidades regadas por gravedad, quedando parte de la superficie sin cultivar debido a los bajos márgenes de utilidad.

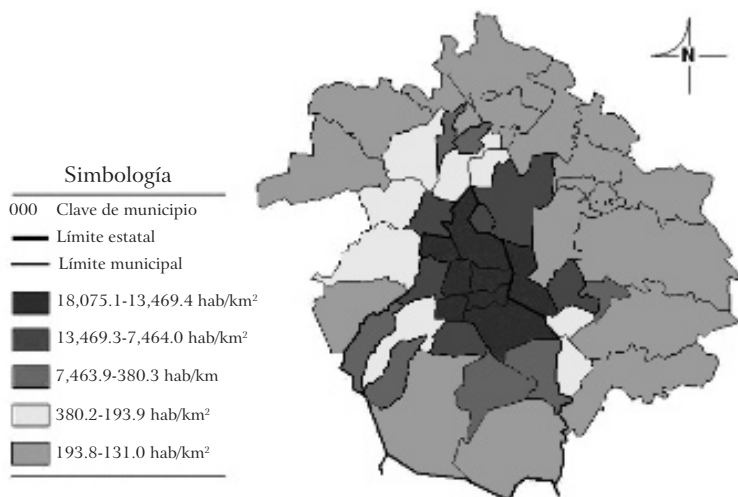
## AGUA PARA LA AGRICULTURA EN LA ZMVM

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) engloba a las 16 delegaciones del Distrito Federal (DF), y más de 30 municipios conurbanos del Estado de México. Esta es la región más densamente poblada del país, con 3,400 hab/km<sup>2</sup>, y está ubicada en la Cuenca del Valle de México (mapa 2). Aunque se trata de una cuenca cerrada, los organismos gubernamentales consideran distintas dimensiones de la superficie:

Región administrativa del Valle de México: . . .	16,400 km <sup>2</sup>
ZMVM. . . . .	4,902 km <sup>2</sup>
DF. . . . .	1,486 km <sup>2</sup>

### MAPA 2

#### POBLACIÓN DE LA ZMVM Clasificación de la densidad de población por unidades geopolíticas, 1995



Fuente: INEGI, *Censo de Población y Vivienda*, México, 1996.

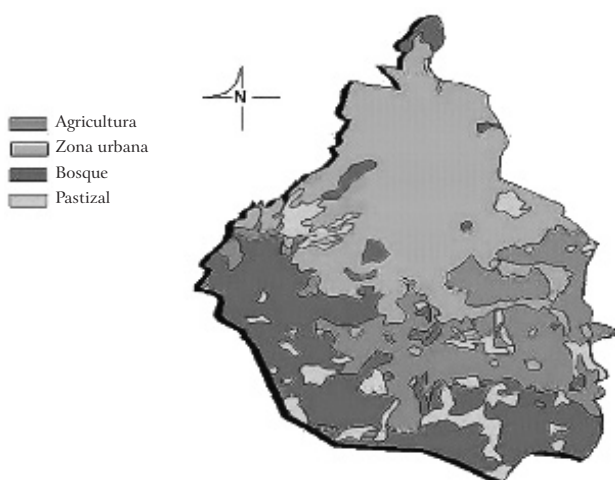
Dado que esta región comprende dos entidades (DF y Estado de México) son la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica de la Comisión de Aguas del DF-DGCOH- y distintos

organismos operadores del Estado de México los encargados de suministrar y proveer de agua potable a la población de la ciudad y de los municipios correspondientes. Las funciones que conciernen a Conagua se realizan a partir de la Región administrativa XIII.

En el DF 60% corresponde a zonas de conservación (88,500 ha), distribuidas entre bosque, pastizal y tierra agrícola (mapa 3). Si se considera al DF más los 18 municipios conurbados más poblados, participan con 0.07% de la superficie cultivada en el país, de las cuales 79% es de temporal y hay 11% de tierras con buenos sistemas de riego. Se trata de unas 23,370 ha de labor, de las cuales, en el año 2000, aproximadamente 80% eran de autoconsumo.

La precipitación de la región es cercana a la media nacional, con 730 mm, variando de la región semiárida (ex lago de Texcoco), con precipitaciones menores a 1200 mm en la Sierra Sur Occidental y llegando a los 1500 mm en la parte alta de la Sierra del Chichinautzin, aun cuando la mayor parte de la población se localiza en la zona norte de la ZMVM donde se tienen precipitaciones menores a 750 mm.

MAPA 3  
USO DEL SUELO EN EL DF  
(Superficie agrícola y urbana)



Fuente: CGSNEGL.

La ZMVM consume aproximadamente  $65 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que equivale a un volumen de  $2 \text{ km}^3/\text{año}$  ( $2,000 \text{ hm}^3/\text{año}$ ), de los cuales 70% se bombea de los acuíferos, excediendo entre 50 y 80% a la recarga natural; 28% se trae del Cutzamala y del Lerma, y 2% se obtiene de manantiales. En el DF se encuentran operando 972 pozos, 86 de los cuales son para riego, mientras que en los municipios del Estado de México la contabilidad no es tan clara: algunas autoridades señalan que en años recientes se hizo una inspección a 581 pozos, de los cuales 480 operaban clandestinamente (Del Pino, 2006). Desde 1954 se declaró una prohibición para nuevos pozos en toda la Cuenca del Valle, hoy en día funciona un mercado negro, especialmente de los pozos destinados a la agricultura, hacia los desarrolladores urbanos e industriales. El INEGI afirma que el mayor número de pozos y volumen de extracción en ambos años se realizó en las delegaciones Tlalpan y Xochimilco. Por su parte, la extracción u oferta de agua subterránea de los municipios metropolitanos del Estado de México solamente representa 4% de la extracción del DF, en tanto que el número de pozos es la séptima parte de los existentes en la capital del país (INEGI, 1999).

En cuanto al uso del agua en la ZMVM, 67% corresponde a uso domiciliario, 17% a uso industrial y 16% a comercio y servicios. De este volumen, el INEGI no contabiliza el uso agrícola y es probable que éste sea despreciable, dado que la actividad se ha retraído de manera importante.

Las aguas tratadas en la planta del Cerro de la Estrella son regresadas a los canales de Xochimilco; el resto sale hacia el distrito de riego de Tula, donde son aprovechadas intensivamente por los agricultores.

La información proporcionada por el INEGI en 1999, confirma la existencia de agricultura tanto de riego como de temporal en el DF; la primera se ha desarrollado principalmente por la existencia histórica de los lagos de Chalco y Xochimilco. En los vestigios que quedan de ellos, es clara la disminución de los contenidos de agua en el subsuelo, así como la contaminación del agua disponible para la agricultura, sobre todo en los canales de Xochimilco.



Por otra parte, la agricultura de temporal se lleva a cabo principalmente en las delegaciones de Cuajimalpa, Álvaro Obregón y Magdalena Contreras, zonas donde se ubica la mayor producción y comercialización de nopal a escala nacional.

Los cultivos anuales del Distrito Federal son el maíz, el frijol, la calabaza, las habas, los chícharos, la avena, la zanahoria y las papas, entre otros. Respecto de los cultivos semipermanentes y permanentes, se cuenta con: rosas, magueyes, nopales y árboles frutales; en poca escala, tejocotes, peras, manzanas, capulines, ciruelos, chabacanos e higos. Los principales cultivos de riego son: maíz, calabaza, amaranto, lechugas, romeros, quintoniles, rábanos, verdolagas, acelgas, espinacas, cilantro, coliflor y flores de temporada.

En Milpa Alta, el nopal fue sustituyendo al maguey pulquero, maíz, frijol, haba, chícharo y avena forrajera (Fierro, 2006) desde 1950, pues produce más ganancia y requiere de menos cuidado y tiempo, además de que no necesita ser regado.

En términos generales, puede decirse que en la ZMVM la agricultura se divide en:

1. Pastizales, avena, maíz y algún otro grano sólo de temporal, ya que los precios no justifican el pago de la energía, aunque se disponga de una concesión para un pozo. Gran parte de esta agricultura es de subsistencia.
2. Producción de flores, plantas y hortalizas en las regiones chinamperas, utilizando tanto la tecnología tradicional como en ciertos casos invernaderos o agroquímicos.
3. Nopal verdura, al cual se dedican 4,000 ha que dan una producción de 260,000 toneladas, y representan 80% de la producción nacional con altísimos rendimientos.
4. Pastizales y bosque, en las zonas altas para sus hatos ovinos y caprinos.

La productividad de los granos como maíz, cebada y avena es similar a otras regiones en condiciones de temporal; en el caso del maíz, unas 3 ton/ha. Si se considera la productividad del agua, por supuesto que no hay gastos de ningún tipo, pero en la zona

caen 700 mm, y este tipo de cultivos utilizan láminas de casi 500 mm para su evapotranspiración, por lo que habría que considerar los 5,000 m<sup>3</sup>/ha, aproximadamente 1.5 kg/m<sup>3</sup> en el caso de maíz ha, y para forrajes se obtienen máximos de 10 ton de masa seca o 25 ton de masa verde.

Las unidades de producción de hortalizas y plantas de ornato en la zona de los canales logran muy alta productividad, dado que se trata de parcelas muy pequeñas de ¼ de hectárea, con cultivos intensivos, y que suele representar 60% del ingreso familiar. Sin embargo, estas actividades mucho más fructíferas que los granos básicos no pueden compararse con la producción del nopal, que en la ZMVM es de 60 ton/ha y genera un ingreso de 350,000 \$/ha. Estos rendimientos han provocado la sustitución de muchos cultivos, aunque sí exigen de inversiones iniciales (más de \$100 mil/ha), no requieren de riego, toleran suelos poco profundos y con cierto grado de degradación.

## CONSIDERACIONES FINALES

EN MÉXICO, los distintos usos del agua son similares a los promedios globales calculados por los organismos internacionales como la FAO y la ONU. Mientras que en el planeta 75% del agua disponible se utiliza para la producción de alimentos y otro 25% para el uso urbano e industrial, los grandes números para México indican que 77% es para uso agropecuario, 10% para uso urbano y 13% para uso industrial.

Debido a que se tiene escasa precipitación en vastas zonas del territorio nacional y a que hay un importante aumento de la población, además de las prácticas inapropiadas, los conflictos por el agua entre agricultores y ganaderos y entre los usos agrícolas y los requerimientos urbanos e industriales son cada vez más frecuentes en diversas zonas del país.

Hay mucho trabajo por hacer en cuanto a reducir el consumo de agua en todos los ámbitos, pero principalmente en los que mayor porcentaje del gasto suponen. En el caso de la agricultura, es imprescindible e impostergable mejorar los sistemas de riego. Las pérdidas de agua dulce en la red de distribución, como ya se demos-

tró, son escandalosas: se “pierden” de cuatro a seis litros de agua por cada 10 que se destinan al riego de la parcela. Aunque es cierto que en el caso del sector agrícola es quizá donde más evidente se hace la función vital que cumple el ciclo del agua en sus procesos de evaporación, precipitación, filtración, etcétera, no podemos aspirar a un aprovechamiento de 100% del agua que se extrae para esta actividad, no obstante sí es posible mejorar los niveles de eficiencia hasta ahora alcanzados.

Las características de los canales de riego, así como el mantenimiento insuficiente que se les da en algunas regiones y distritos de riego, provocan la pérdida de un importante volumen de agua que se filtra al subsuelo y que en muchos casos no cumple, en el nivel esperado, con la retroalimentación necesaria de los mantos freáticos. Esto lleva a elevar notoriamente los costos relativos por extracción, que en un programa de mediano plazo podrían llegar a ser equivalentes al costo de invertir en sistemas de riego más eficientes, en revestir 100% al menos la red de los canales primarios o en llevar a cabo un programa de mantenimiento de presas, pozos y canales adecuado.

El agua que se destina al uso agrícola, es un asunto vital que se debe atender para resolver el problema de escasez y prever un escenario de encarecimiento y posible agotamiento del recurso en muchas zonas del país en los próximos años. El aumentar la productividad del agua en la agricultura es una prioridad nacional; se debe acrecentar la eficiencia de conducción y mejorar las técnicas de riego. La actual crisis del maíz no hace sino acentuar esta necesidad: México debería producir 20,000 millones de toneladas de maíz blanco y esto requiere de tierra y agua.

En la ZMVM el problema es inverso; se trata de la región más densamente poblada, donde viven casi 20 millones de personas, por lo que 67% del agua se utiliza para uso urbano domiciliario, 17% para la industria y 16% restante para servicios. En las estadísticas oficiales no se menciona el uso agrícola y esto se debe a que los pozos destinados a estos usos ya se han transferido al sector urbano e industrial, de manera legal o a veces clandestina.

La agricultura que se sigue practicando es de temporal. En ciertos casos, se aprovechan las aguas tratadas o de reutilización,

y es mucho más productiva en términos económicos que dicha actividad a escala nacional. Esto se debe a que es más intensiva, se produce cerca del principal mercado, son productos más especializados (hortalizas, flores) y por ende de más valor, y las zonas de temporal ayudan a la recarga de acuíferos y al mantenimiento del ambiente.

Esto indica que para disminuir el consumo de agua en la ZMVM hay que mirar básicamente hacia el sector industrial, pero principalmente hacia el consumo doméstico promoviendo el uso de dispositivos ahorradores y tal vez mediante modificaciones en la normatividad para las construcciones, con el objeto de que se obligue al tratamiento y reuso local.

## BIBLIOGRAFÍA

*Censo agrícola, ganadero y ejidal* 1991.

CETEMAC (2003), *El recurso hídrico en México. Análisis de la situación actual y perspectivas futuras*, México, Miguel Ángel Porrúa-Cetemac-Fund, Nipona.

CONAGUA, *Gerencia de Distritos y Unidades de Riego*, documentos varios.

——— (2001), *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*, México, Conagua.

CORTÉS, J.E. y A.H. Romero (1993), *Aprovechamiento de aguas residuales en agricultura: situación actual en México*, Cuernavaca, Morelos, Comisión Nacional del Agua (MS).

JACOBO-VILLA, M.A. y Elsa Saborío F. (2004), *La gestión del agua en México. Los retos para el desarrollo sustentable*, México, Miguel Ángel Porrúa-UAM.

SANTAMARÍA, S. y P. Becerra (2007), *Los conflictos por agua en México: avances de investigación*, mimeo., México, INE.

## FUENTES ELECTRÓNICAS

<http://www.colpos.mx/IRENAT/hid/infgenHid.htm>

<http://www.oirsa.org/Publicaciones/VIFINEX/Manuales/Manuales-2002/El-Salvador/BPA-En-Papaya-05.htm>

[http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/389/conf\\_agua.html?id\\_pub=389](http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetas/389/conf_agua.html?id_pub=389)

## *El sistema de concesiones del agua en México y la participación de los grandes consorcios internacionales*

### INTRODUCCIÓN

EL TEMA DEL AGUA se ha convertido en las últimas décadas en un asunto importante no solamente por el incremento en el consumo resultado del desarrollo urbano e industrial y de la creciente contaminación, sino también porque este vital líquido se ha transformado poco a poco en un bien económico que está pasando de la administración del Estado a la administración privada, en la modalidad que se conoce ahora como la participación pública y privada (PPP). En efecto, la apertura económica iniciada desde la década de 1980 ha traído consigo una serie de modificaciones a la Ley de Aguas Nacionales del 2004, así como al organismo que se encarga de su administración, la Comisión Nacional del Agua (Conagua), lo que ha propiciado la promoción del sistema de concesiones que abren el camino a la participación del capital privado.

La apertura económica que el mundo ha conocido en las últimas décadas, sin duda, nos deja una lección que se relaciona con la reafirmación de la importancia de las empresas transnacionales, y en específico de su participación en nuevos sectores vinculados con los recursos naturales, como lo es el agua. De esta forma, la mercantilización del agua se convierte poco a poco en un principio fundamental en el mundo, así como en nuestro país, situación que han sabido aprovechar bien los grandes conglomerados.

\* Profesora-investigadora adscrita al Departamento de Economía de la UAM, Unidad Iztapalapa, directora del Centro de Documentación Económica y Financiera sobre Norteamérica (Cedefna), [del@xanum.uam.mx](mailto:del@xanum.uam.mx).

El debate al que nos enfrentamos es entonces el de la mercantilización de un bien público y la participación de las empresas transnacionales.

La gestión, distribución y saneamiento del agua es un tema delicado en México, toda vez que 12 millones de mexicanos carecen del servicio de agua potable, y 23 millones están desprovistos de sistemas adecuados de saneamiento. La situación más grave se detecta en el medio rural, donde las coberturas de agua potable y alcantarillado son de 68 y 36.7%, respectivamente. Estas cifras nos muestran que el acceso al agua en México es una cuestión cada vez más difícil de resolver, ante lo cual los gobiernos de corte neoliberal consideran que el capital privado resolverá un asunto tan delicado como es la distribución y saneamiento del agua cediendo espacios al capital privado.

Resulta paradójico que, a medida que se requiere más de este vital líquido, los estados nacionales se conviertan en promotores de la privatización y participen cada vez menos en la explotación, distribución y cuidado del recurso. La propia Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento del 2004 mencionan que la gestión del agua debe generar recursos económicos y financieros necesarios para realizar sus tareas inherentes, bajo el principio de que “el agua paga el agua”, conforme a las leyes en la materia. Este planteamiento ha sido ampliamente difundido por el Banco Mundial, el cual menciona que se debe pagar un precio justo para evitar el desperdicio, política que se lanza en aras de preparar el camino a la privatización del sector y que ha sido bien aprovechada por los grandes consorcios internacionales.

Nos encontramos entonces con dos elementos importantes; por una parte, con una normatividad encaminada a la desregulación gradual que permite al Estado mexicano abrir el sector a la participación de capital privado, ya sea nacional o extranjero, relacionado con la distribución, saneamiento del agua y factoraje, y por el otro, con el proceso de expansión de las empresas transnacionales en el ramo. Estas iniciativas desde luego gravitan alrededor de los programas de privatización financiados por el Banco Mundial así como por los programas que se han puesto en mar-

cha, como Finfra-Banobras,<sup>1</sup> que disponen de recursos financieros que van a fondo perdido. Este tipo de facilidades se otorga sin discriminación a empresas nacionales o extranjeras, y ha sido aprovechado por un grupo muy reducido de trasnacionales liderado prácticamente por dos empresas<sup>2</sup> que disponen de tecnologías de punta para atenuar los problemas relacionados con la disponibilidad y contaminación del recurso, así como sistemas de factoraje eficientes.

Por eso, este capítulo se enfoca, en una primera parte, al análisis de los cambios económicos que se han dado en México y sus repercusiones en una menor participación del Estado en el sector hidráulico, y en la segunda se hace un recuento de las principales empresas trasnacionales y su participación en México a través de sus diversas alianzas con empresas mexicanas.

Lo que aquí planteamos es que la participación del capital privado no resolverá los problemas de falta de agua y su distribución, ya que ésta se enfoca principalmente a conglomerados importantes y con infraestructuras ya existentes, es decir, a las zonas rentables, y en segundo lugar, que el sistema de concesiones ha recaído prácticamente en dos empresas trasnacionales, lo que pone en riesgo un recurso vital y estratégico para cualquier sociedad, por lo que afirmamos que en definitiva ésta debe ser una tarea a la cual el Estado no debe renunciar.

## LA APERTURA ECONÓMICA Y SU IMPACTO EN EL SECTOR HIDRÁULICO

DESDE la década de 1980, el mundo ha experimentado una creciente participación de las grandes empresas en algunos sectores, los cuales hace algunos decenios eran considerados estratégicos, y por lo tanto, eran manejados exclusivamente por el Estado, como los servicios, entre los que destacan la distribución de agua,

<sup>1</sup>Fondo de Inversión en Infraestructura y Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos.

<sup>2</sup>A pesar de que son tres las más importantes, no queda duda que las dos trasnacionales Suez y Vivendi controlan dos terceras partes del mercado mundial del agua, seguidas por Saur (empresas francesas).

electricidad, gas, etcétera. Las políticas de apertura económica que iniciaron a mediados de la década de 1980 cobraron fuerza en los noventa, y están marcadas por una fuerza privatizadora sin precedente en la historia. La forma en que se han puesto en marcha estas modificaciones muestra, de manera errónea, que estos sectores no son ahora considerados estratégicos y que pueden volcarse fácilmente a la participación de las grandes empresas. Sin embargo, el agua es un recurso estratégico, además de que tampoco es certero que la participación del capital privado ofrezca soluciones adecuadas para responder a las múltiples funciones y demandas que surgen en una ciudad o una cuenca, particularmente cuando los precios del vital líquido se incrementan y los recursos escasean.

Como en muchos países, la gestión del agua ha estado hasta hace poco tiempo bajo la completa responsabilidad del Estado, sin embargo, su participación se ha ido modificando. En México, durante el periodo posrevolucionario de consolidación institucional, la gestión del agua estuvo marcada por la construcción de grandes obras de infraestructura y el establecimiento de una administración orientada sobre todo hacia la gestión de la oferta, en particular para satisfacer la demanda del sector agrícola. Dentro de las instituciones que antecedieron a la Conagua destacan la Dirección de Aguas, Tierras y Colonización, creada en 1917; la Comisión Nacional de Irrigación, en 1926; la Secretaría de Recursos Hidráulicos, en 1947, y la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en 1976.

La historia del capital privado en el sector del agua no es nueva en México. Algunas concesiones fueron hechas en Puebla, Saltillo y Monterrey en 1855, 1899 y 1904, respectivamente. En 1920, había 20 concesiones operando en el territorio, sin embargo, a partir de la década de 1940, el sector fue retomado por el Estado. En la década de 1970, las necesidades de agua eran menores, apenas se iniciaba un proceso importante de industrialización y las concentraciones urbanas no habían alcanzado las magnitudes que conocemos hoy en día.



Hasta la década de 1980, el agua fue considerada como un bien público. Sin embargo, con el gobierno de De la Madrid (1982-1988) se iniciaron algunas reformas tendientes a la apertura económica en algunos sectores de la economía, y de hecho, ésta fue la punta de lanza para dar inicio a una serie de modificaciones en materia de inversión privada en los servicios.

El gobierno de Salinas de Gortari fue aún más lejos, ya que su objetivo estaba encaminado, de manera importante, a la privatización de muchos sectores de la economía donde el agua no era la excepción, por lo que la reorganización del sector se enmarcó dentro de una serie de iniciativas que se pusieron en marcha en ese periodo.

La reforma económica neoliberal que se impulsó durante la administración de Salinas de Gortari se explica por el fortalecimiento del grupo tecnocrático neoliberal en el seno del partido gobernante y las crecientes presiones emanadas del Consenso de Washington (organismos multilaterales, el gobierno de Estados Unidos y el capital financiero) para convertir la apertura externa y la privatización mexicana en procesos irreversibles (Guillén, 2000: 77).

La administración salinista se fue muy a fondo en la liberalización, y parte de ese programa se centró en la flexibilización de la política de inversión extranjera, lo que obligó a nuestro país a revisar el marco regulatorio con el objetivo de hacer que México resultara más atractivo y seguro para el capital foráneo. Evidentemente, esta revisión estuvo auspiciada con fuerza por el Banco Mundial.

La privatización de los servicios del agua se ha visto reforzada por el Acuerdo General de Comercio de Servicios (GATS, por sus siglas en inglés), y por la Organización Mundial de Comercio (OMC), cuyo marco jurídico permite la entrada de inversionistas extranjeros al sector hidráulico de los países miembros, entre ellos México.

Estas políticas no solamente se ubicaban dentro de los parámetros o “sugerencias” tanto del Banco Mundial como del Fondo Monetario Internacional, que se encuentran bien delineadas en

lo que se conoce como el Consenso de Washington, sino que esta nueva aventura con el capital extranjero era fuertemente apoyada bajo el principio de la eficiencia y el mejoramiento del marco jurídico, desde luego, asesoradas por estas instituciones internacionales.

El apoyo decisivo de algunas instituciones internacionales como el Banco Mundial se ha visto reflejado en el incremento del número de proyectos de inversión no sólo en nuestro país sino a escala mundial, aumento que ha tenido dos momentos importantes, como se muestra en el cuadro 1. El primero a partir de 1970, cuando en una década se triplicaron los proyectos y, por lo tanto, los financiamientos, y el segundo, en la década de 1990. Estos datos coinciden con todo el proceso de apertura que se ha observado desde la década de 1980 y de manera más contundente en los noventa. El Banco Mundial promueve principalmente programas para la creación de acueductos, presas, programas de irrigación, saneamiento y de gestión del agua. De manera evidente, en este tipo de proyectos la participación de las grandes empresas trasnacionales es fundamental, como veremos más adelante.

CUADRO 1  
PROYECTOS DEL BANCO MUNDIAL EN IRRIGACIÓN  
Y APROVISIONAMIENTO DE AGUA

<i>1947-1960</i>	<i>1961-1970</i>	<i>1971-1980</i>	<i>1981-1990</i>	<i>1991-2000</i>
11	79	288	259	367

Tomado de: Lasserre, Frédéric y Luc Descroix, 2005.

Fuente: Banque mondiale, et The World Bank & the World Comission on Dams Report Q&A, Banque mondiale, [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org).

Como parte de los programas del Banco Mundial, entre 1990 y 1992, el gobierno federal canalizó importantes inversiones a través del Banco Nacional de Obras y Servicios Público (Bano-bras) y la Conagua, provenientes del Banco Mundial y del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). En este esquema participó también el sector privado, cuyo objetivo era eliminar poco a poco los subsidios. En este contexto, se comprenden bien las modificacio-

nes al artículo 27 constitucional y a la Ley de Aguas vigente a partir de 1992, que consideran transformaciones fundamentales para incentivar la realización de obras con modalidades de financiamiento con recursos provenientes de la iniciativa privada (Martínez, 2002: 77-78).<sup>3</sup>

La reforma del cambio estructural que se instauró a mediados de los ochenta incluía desde luego al sector hidráulico, y es así como en 1989 se creó la Comisión Nacional del Agua como órgano desconcentrado de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, facultándosele para tomar decisiones de uso en cantidad y calidad de las aguas nacionales, cuyos objetivos generales eran:

- Fomentar el uso eficiente del agua en la producción agrícola.
- Fomentar la ampliación de la cobertura y calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
- Lograr el manejo integral y sustentable del agua en cuencas y acuíferos.
- Promover el desarrollo técnico, administrativo y financiero del sector hidráulico.
- Consolidar la participación de los usuarios y la sociedad organizada en el manejo del agua y promover la cultura de su buen uso.
- Disminuir los riesgos y atender los efectos de inundaciones y sequías.

Hacia finales de 1994, las transformaciones estructurales en el país eran ya más profundas y estaban orientadas a una perspectiva de integración de la gestión ambiental con la creación de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Semarnap), encargada de coordinar la administración y fomentar el aprovechamiento de los recursos naturales renovables y la protección al medio ambiente. Con la creación de la nueva secre-

<sup>3</sup> Cabe señalar que esta nueva ley contó con la asesoría de consultores públicos y privados franceses de la cuenca de Normandía que administran el río Sena, sobre todo en lo que se refiere al manejo de las cuencas hidrológicas. Se debe señalar que entre los asesores privados se encuentran las tres principales empresas trasnacionales que están en el negocio del agua, como son Suez-Ondeo, Vivendi y Saur.

taría, se reestructuró la asignación de las atribuciones ambientales, y el sector hidráulico se integró a la recién creada Secretaría de Estado, a través de la Comisión Nacional del Agua y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), hasta entonces sectorizados en la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Actualmente la Conagua permanece en el sector ambiental con autonomía reforzada (Martínez, 2002).

A lo largo del sexenio de Salinas de Gortari, la Conagua fortaleció la coordinación de acciones públicas y la concentración de los sectores social y privado. Entre otras cosas, se estableció un sistema de precios para incentivar la inversión, se proponía que, aun cuando el agua se asumía como un bien común del dominio público de la federación y se dejaban a salvo los derechos del gobierno para administrarla, los usuarios también podían hacerlo bajo la normatividad de la ley, la autorización y supervisión de la Conagua en cumplimiento de la misma.

La Ley de Aguas Nacionales, aprobada en 1992, permite una mayor intervención del sector privado en el funcionamiento, construcción, operación y administración de los sistemas hidráulicos. En este sentido, el proceso de privatización se sustenta mediante figuras jurídicas, como la concesión y los contratos por servicio, que permiten a los particulares intervenir en los servicios de agua potable y alcantarillado con adecuada protección de sus inversiones (Martínez, 2002: 84).

Otro aspecto importante de este reordenamiento en materia hidráulica es la delegación de facultades administrativas a los municipios. Sin embargo, en muchos casos, éstos no disponen de recursos financieros suficientes para llevar a cabo obras de infraestructura y/o mantenimiento, y se ven obligados a recurrir al sector privado. De esta forma, la privatización se ha justificado en función de la disminución del gasto público, la menor eficiencia de las empresas estatales y la falta de recursos de los municipios.

La nueva política del agua ha puesto en práctica diversas formas de participación del sector privado, ya que lo puede hacer activamente en la construcción, operación y cobro de los servicios, obteniendo niveles adecuados de rentabilidad. Así, el sector

privado ha sumado su capacidad financiera y la que ofrecen los programas gubernamentales, su tecnológica y gestión en servicios de agua potable, saneamiento y alcantarillado.

La nueva Ley de Aguas, establece mecanismos inéditos para propiciar la participación privada como:

- Contratos de servicios de obra pública tradicionales, que se fijan cuando el capital privado sólo es prestador de un determinado número de servicios estipulados en un contrato que se formula entre un organismo operador y una empresa privada.
- Contratos de obras y servicios con financiamiento recuperable y concesiones para la operación, administración, mantenimiento de infraestructura y servicios asociados, que en la práctica es la sustitución del organismo operador municipal por una empresa determinada, la cual ante los usuarios se constituye en un proveedor sustituto que adquiere las responsabilidades y obligaciones del organismo concesionario.
- La concesión integral que incluye la ampliación de la infraestructura hidráulica (Martínez, 2002: 91-92).

Las políticas del Estado mexicano y su interés por abrir el sector a la iniciativa privada, propiciaron la incorporación al *Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006* del Programa para la Modernización de los Organismos Operadores de Agua (Promagua), diseñado especialmente para promover la participación del sector privado en la prestación del servicio en localidades, preferentemente de más de 50,000 habitantes, mediante la aportación a fondo perdido. Su financiamiento proviene del BID, y los créditos se otorgan a través de Banobras que combina apoyos financieros no recuperables de Finfra<sup>4</sup> para proyectos en el marco del Promagua y que fue la punta de lanza para avanzar en la privatización.

<sup>4</sup>El Fondo de Inversión en Infraestructura es un fideicomiso del gobierno federal destinado a apoyar financieramente proyectos de inversión en sectores de alta rentabilidad social en su mayoría no recuperables, y se dirige principalmente a carreteras, agua y saneamiento y residuos sólidos. En agua y saneamiento, los apoyos se canalizan a través del Promagua.

Se debe señalar que el agua es un tema vital en México, no solamente por su mala distribución, que se relaciona con la disponibilidad física del recurso y el crecimiento de la población, sino también por los problemas de contaminación, disminución de los mantos freáticos, etcétera, por lo que realmente el Estado necesita encontrar soluciones, las cuales está buscando en la participación del sector privado.

Los créditos que se otorgan estimulan la participación del sector privado en los asuntos relacionados con las concesiones de los diversos servicios relacionados con el agua, por lo que éstos se dirigen a las empresas privadas, ya sea de forma individual, es decir de la empresa solamente, o de forma mixta en una asociación con el sector público (en este caso, el municipio).

El sistema de concesiones está bien apuntalado con dos instituciones importantes, como son el Banco Mundial y Banobras. En el 2001, el Banco Mundial aprobó un préstamo de 250 millones de pesos a la Conagua, que fue utilizado para crear el Promagua en el 2001 por parte del gobierno federal que, como se mencionó, es un programa que canaliza apoyos de Finfra a proyectos de inversión en agua potable, alcantarillado, saneamiento e infraestructura, y por tanto, proporciona préstamos a las municipalidades para que actualicen y expandan sus sistemas de abastecimiento de agua potable (lenguaje del Banco Mundial para justificar la privatización); también fue utilizado para modificar las leyes estatales sobre el agua para que se imponga la recuperación total del costo; desde luego, está diseñado para captar inversión privada en condiciones que permitan maximizar los beneficios.

Promagua coordina una vasta reestructuración de los sistemas de agua potable mediante la provisión de generosos subsidios a proyectos relacionados con la atracción de capitales privados, y de acuerdo con Maud Barlow, estableció un banco de datos nacional para ayudar a las corporaciones extranjeras a decidir dónde invertir en instalaciones de agua en México. En esta iniciativa, la entidad gubernamental recibió ayuda del World Environment Center (WEC), con sede en Nueva York, que promueve asociaciones entre empresas y gobiernos, y es apoyada por varias trasnacionales (González, 2005).

En junio de 2003, el Banco Mundial aprobó otro préstamo a México, para el *desarrollo de la infraestructura descentralizada*, que comprende servicios de infraestructura para algunos estados. La primera etapa incluyó transporte, agua, alcantarillado y vivienda. Los préstamos se realizaron a través de Banobras, siempre y cuando los estados cumplieran con el establecimiento de tarifas, autosuficiencia del proyecto mediante la recuperación del costo, un marco regulatorio adecuado y el mejoramiento de la participación del sector privado ([http://www.citizen.org/cmep/Water/cmep\\_Water/reports/mexico/articles.cfm?ID=10417](http://www.citizen.org/cmep/Water/cmep_Water/reports/mexico/articles.cfm?ID=10417))

A través de Finfra, auspiciado por Banobras y la Conagua, y supervisado por la Semarnat, se otorgaron apoyos técnico-financieros a los organismos encargados de suministrar el vital recurso, bajo el compromiso de impulsar el mejoramiento, eficiencia y cobertura en servicios de agua potable y saneamiento con participación privada.

Según datos de Banobras, en el 2006, 24 estados se sumaron al Promagua bajo la regla de que a mayor participación privada mayor el subsidio que se otorgaba bajo las cuatro modalidades de participación:

- A “Título de concesión a empresa privada”, que consiste en la aportación a fondo perdido por un monto de 35 a 49 por ciento.
- Estos mismos porcentajes se otorgan en la modalidad de “Título de concesión a empresa mixta con participación minoritaria del municipio”.
- A “Título de concesión a empresa mixta con participación mayoritaria del municipio”. Se otorga de 20 a 30% del total de la inversión.
- La cuarta modalidad es “Contrato de prestación integral de servicios”, que aporta de 25 a 40% (*El Financiero*, 2006).

Como se observa, los términos de los financiamientos que se otorgan a las empresas privadas al concesionar un servicio son de mayores privilegios, ya que lo que va a fondo perdido es superior

en relación con un financiamiento que para el mismo fin se otorga a una participación mayoritaria del municipio.

Cabe señalar que el número de permisos de zonas federales inscritas en el Registro Público de Derechos de Agua (Repda), creado en diciembre de 1992 junto con la Ley de Aguas Nacionales, se ha incrementado considerablemente: ascendió de 21,300 en 1996 a 84,576, para alcanzar la cifra de 95,628 en el 2005 (Conagua, 2006: 122).

Para acceder a estos recursos, los gobiernos estatales y municipales deben aceptar los objetivos del programa, admitir la realización de un estudio de diagnóstico y planeación integral, y aceptar el programa de inversiones con participación de capital privado.

En el 2005 el gobierno federal solicitó al Banco Mundial una nueva estrategia para privatizar el agua. En el análisis que realizó este organismo internacional, se menciona que en México hay restricciones institucionales y políticas, así como una excesiva politización y carencia de acuerdos institucionales y regulatorios a escala estatal y municipal, así como precios inadecuados del vital líquido. En el mismo documento, se destaca que el Banco Mundial buscará ayudar al gobierno mexicano a estructurar y poner en marcha un sistema de financiamiento de agua, y mejorar el desarrollo técnico y comercial de instalaciones de agua seleccionadas (*La Jornada*, 2005: 52).

La reestructuración del sector hidráulico no solamente se ha referido a la apertura del sector hacia el capital privado, sino que también entra en la lógica de convertir al Estado en un simple administrador de recursos, toda vez que como parte de los cambios estructurales el personal que labora en la Conagua ha disminuido de forma importante. Así tenemos que en 1989, año de creación de la Conagua, se contaba con 38,000 empleados; en diciembre del 2002 se redujo a 19,704; en 2003 disminuyó a 17,167, en 2004 a 16,479 y a 15,960 en 2005; es decir, que el personal en 16 años se redujo 50% (Conagua, 2006: 124).

Desde luego, los gobiernos de derecha simpatizan por completo con la idea de privatizar el sector, como fue manifestado por el actual presidente Felipe Calderón, el cual, en una de sus prime-



ras entrevistas con los empresarios, remarcó la importancia del capital privado en el sector (*La Jornada*, 2006), promoción que continúa haciendo en el 2008 (*La Jornada*, 2008). Sin embargo, al parecer, una de las limitaciones a las que se ha enfrentado el sector privado es lo politizado que está el tema del agua en México, en el sentido de que un incremento en las tarifas, que demanda particularmente el sector privado, puede afectar no solamente la imagen de un representante popular o de un partido político, sino también las carreras políticas.

Hasta la fecha, hay varios proyectos de participación del sector privado relacionados con el saneamiento del agua potable, la construcción y operación de acueductos, y la administración de los sistemas de agua potable y alcantarillado en ciudades como Pachuca, Aguascalientes, Saltillo, Puebla o el DF, entre otras.

También hay algunas experiencias de participación privada en lo que se refiere al tratamiento de aguas residuales en ciudades como Puebla, Toluca, Cancún. En esta última, por ejemplo, se ha desarrollado un esquema de participación en el que el sector privado financia, construye y opera un sistema de suministro de agua en bloque, que el organismo operador recibe para su distribución a los usuarios pagando al inversionista una tarifa por metro cúbico de agua suministrada<sup>5</sup> (Martínez, 2002: 99).

Una de las limitaciones actuales de la concesión para el abastecimiento de un producto esencial, como es el agua, es que el sector no está bien regulado, no hay suficiente información disponible y, por lo tanto, no hay forma de evaluar el manejo del recurso ni por parte del organismo operador ni del concesionario, por lo que es inevitable que aparezca una serie de diferencias en lo que se refiere a criterios de actuación. Quizá uno de los criterios más importantes es el horizonte de tiempo con que se diseñan los sistemas operativos, ya que para una empresa privada, la rapidez con que se recupera una inversión es determinante en la valoración que ponen los mercados en su desempeño, mientras

<sup>5</sup> Cabe señalar que la tarifa que se paga por el suministro de agua en Quintana Roo es una de las más altas a escala nacional (en particular, la tarifa hotelera), ya sea que se trate de uso doméstico, comercial o industrial.

que para el operador público, por el contrario, la recuperación de la inversión no es tan importante como la durabilidad de la instalación –medido en decenios, lo que implica inversiones iniciales superiores–, así como su costo. Por eso, el sistema de concesiones debe ser revisado cuidadosamente, además de que vale la pena analizar a quién se le otorgan las concesiones, como veremos en el próximo apartado.

### LAS EMPRESAS TRASNACIONALES Y SUS CONCESIONES EN MÉXICO

CUANDO hablamos de concesiones, sin duda debemos hacer referencia a quién se le otorga el permiso para proporcionar un servicio, ya sea que se trate del desarrollo de infraestructura, saneamiento, distribución o factoraje, así como el tiempo de duración de la concesión, volumen de líquido a distribuir, costos, precios, etcétera.

Particularmente, nos interesa ver en este apartado a qué empresas se les otorgan las concesiones en México, aspecto importante, puesto que, en la mayoría de los casos, la participación del sector privado en el sector hidráulico está determinada principalmente por la participación de tres empresas trasnacionales que han entretejido una serie de vínculos en nuestro país de forma muy dinámica, a través de inversiones de la propia empresa trasnacional o de alguna de sus filiales, o mediante las diversas alianzas estratégicas que han consolidado con empresas locales en los últimos años.

En el mundo hay dos empresas trasnacionales que poco a poco han ganado espacio a escala internacional por medio de fusiones y adquisiciones con empresas locales, y México no es la excepción. Se trata de dos empresas francesas con amplia experiencia, especializadas en todo el ciclo del agua, y que han operado en Francia desde el siglo XIX.

Una de ellas, la más antigua, es la Compagnie Générale des Eaux, transformada en 1998 en Vivendi, que tiene actualmente 150 años y está asociada con Thames, una empresa inglesa que

controla buena parte de la distribución y saneamiento del agua en Gran Bretaña. Vivendi más tarde fue renombrada como Veolia y opera en América del Norte a través de las siguientes empresas, entre otras:

- Dalkia North America
- Veolia Water North America
- Veolia Water International
- Proactiva Medio Ambiente

[http://www.veoliaproprete.com/qui\\_sommes\\_nous\\_identite\\_groupe\\_veolia\\_us.asp?rub=ABC](http://www.veoliaproprete.com/qui_sommes_nous_identite_groupe_veolia_us.asp?rub=ABC)

El otro consorcio más importante a escala mundial es la Lyonnaise des Eaux, también conocida como Suez-Ondeo,<sup>6</sup> que tiene 120 años y se ha asociado con empresas de gran talla, como Aguas de Barcelona (España), Essex and Suffolk (Reino Unido), Infilco, Lysa (Francia), Ondeo, Northumbrian Water, Safege y United Water (Estados Unidos), entre otras.<sup>7</sup> Suez, en su división de medio ambiente, opera a través de tres empresas a escala mundial (<http://www.suez.com/>):

- Lyonnais des Eaux
- Ondeo Norteamérica
- Sita
- Degrémont

Estas dos empresas, Veolia y Suez, tienen mucha experiencia, tanto en Francia como a escala mundial en todo lo relacionado

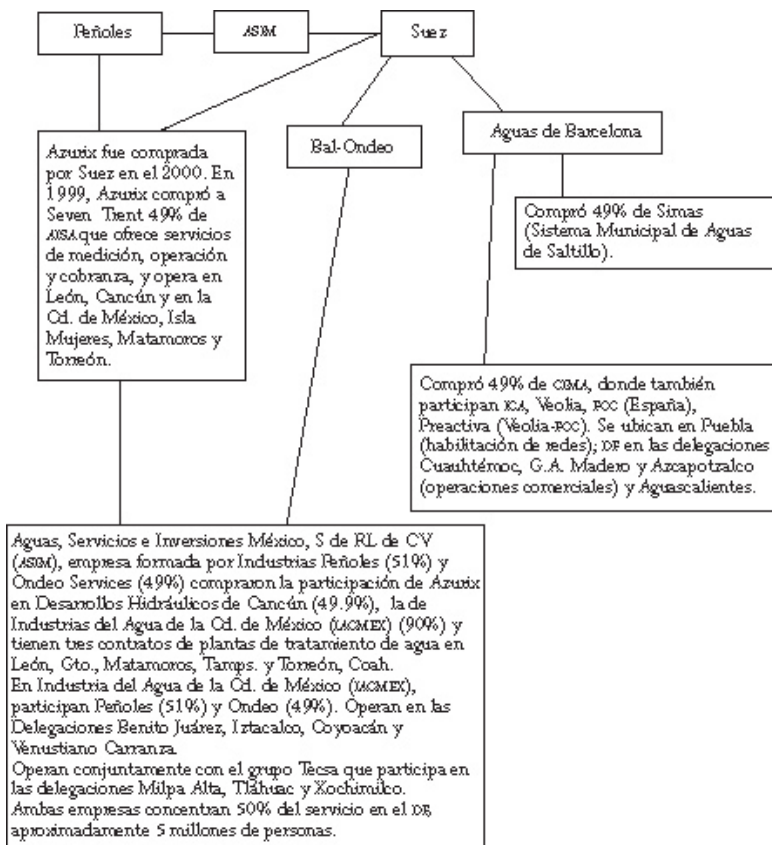
<sup>6</sup>La primera concesión de esta empresa fue para distribuir agua en la ciudad de Lyon, Francia, en 1853. En 1860, ya abastecía de agua a París y en 1869 a los alrededores de esta ciudad. En cuanto a Suez, ésta fue creada en 1880 por el banco Crédit Lyonnais y actualmente se dedica al tratamiento, producción y distribución de agua embotellada, y a la distribución y tratamiento de aguas residuales.

<sup>7</sup>Suez es el primer proveedor de agua en el mundo. Proporciona servicios de extracción, distribución y tratamiento a más de 125 millones de usuarios alrededor del Globo. Cuenta con 60,000 clientes industriales, ha construido y operado más de 10,000 plantas de tratamiento de agua y en 2002 firmó un convenio con la UNESCO con el fin de reducir en 50% el número de personas que carecen de agua potable y servicios sanitarios para el año 2015, <http://209.238.146.491>.





## SUEZ: VÍNCULOS CON EMPRESAS MEXICANAS QUE OPERAN EL AGUA EN VARIAS ENTIDADES DE LA REPÚBLICA



Fuente: Elaboración propia.

Barcelona y la mexicana Peñoles (véase diagrama). Suez y Grupo Peñoles anunciaron su asociación para hacerse cargo de los intereses que mantenía en México una tercera compañía, la estadounidense Azurix, por un monto de más de 90 millones de dólares. Azurix manejaba varios negocios, todos derivados de concesiones gubernamentales, como el sistema de agua potable y alcantarillado en Cancún e Isla Mujeres, la construcción y operación de

plantas de tratamiento de agua en León, Matamoros y Torreón. También tiene a su cargo la mitad de los servicios de agua en la Ciudad de México, que incluyen instalación de medidores, toma de lecturas, expedición y cobro de boletas y reparación de redes, por lo que controla 50% del servicio de factoraje en el DF –aproximadamente cinco millones de personas–, que representa casi 50% del total de la población que habita en la Ciudad de México. Sin embargo, hay un detalle que llama la atención, y es que Azurix, la compañía que originalmente consiguió los contratos, es una subsidiaria de Enron, la protagonista de uno de los mayores escándalos de Wall Street. No obstante eso no fue un impedimento para adquirirla.

Industrias Peñoles se ha consolidado también en el negocio del agua; adquirió 51% de la empresa Aguas, Servicios e Inversiones de México, S de RL de CV (ASIM), y se debe señalar que el grupo francés Ondeo Services adquirió el 49% restante; esta última –filial de Suez– es líder mundial en servicios de agua, y se dedica a la inversión, desarrollo y operación de negocios relacionados con la distribución, mantenimiento de redes, tratamiento y servicios de agua, y ambas adquirieron la participación de Azurix en:

- 1) Desarrollos Hidráulicos de Cancún (DHC) (49.9%).
- 2) Industrias del Agua de la Ciudad de México (IACMEX) (90%).
- 3) Tres contratos de construcción, operación y transferencia (COT) de plantas de tratamiento de agua en León, Gto., Matamoros, Tamps., y Torreón, Coah.

El monto total invertido asciende a 93.7 millones de dólares, de los cuales 50% corresponde al precio de las acciones y el 50% restante a la deuda de dichas empresas con Azurix. Los recursos para la compra de los activos mencionados fueron financiados en moneda local a través de un crédito puente a ASIM otorgado por Banobras (50%) y BBVA Bancomer (50%), mismo que será sustituido en un lapso no mayor a 36 meses, por la estructura de capital que los socios decidan para ASIM, de acuerdo con el plan de negocios de la misma.

Conforme a Suez, los contratos mexicanos son un elemento clave hacia la consolidación del liderazgo de Ondeo en Norteamérica (filial de Suez), que representa el segundo mercado prioritario después de Europa, y es un elemento clave para su expansión en el continente americano. Esta empresa también tiene contratos en otras ciudades, como Laredo, Saltillo, Aguascalientes, Puebla, Piedras Negras, Ciudad Acuña, Ciudad Juárez y Monterrey, todas ellas con una población importante y con problemas de abasto de agua.

En el caso de los municipios Benito Juárez (Cancún) e Isla Mujeres en Quintana Roo, Suez empezó a participar de forma activa desde 1993, cuando, junto con otras empresas locales, recibió una concesión integral por 30 años en los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento en ambos municipios; los tres principales objetivos de este negocio consisten en: *a*) ampliar el servicio de distribución de agua potable a las poblaciones aledañas; *b*) mejorar el índice de cobranza, y *c*) garantizar un servicio de calidad óptima para respaldar el gran crecimiento de la industria hotelera de la región. El Grupo Mexicano de Desarrollo (GMD), aporta 50.1% del capital, mientras que la administración y operación del proyecto se encuentran en manos de Bal-Ondeo, sociedad compuesta por Industrias Peñoles y Suez Environment.

Por su parte, Veolia también ha llevado a cabo varias alianzas con empresas mexicanas y opera principalmente a través de tres:

- Preactiva México, que a su vez está asociada con Veolia Environment, la empresa española Fomento de Construcciones y Contratos (FCC) y Grupo ICA. Se especializa en prestar servicios medioambientales, en la gestión de agua y residuos, y opera en la Ciudad de México y Aguascalientes.
- Concesionaria de Aguas de Aguascalientes (CAASA), tiene un contrato con el ayuntamiento de Aguascalientes para prestar los servicios de agua potable y alcantarillado de la ciudad capital, asimismo, lleva a cabo la recaudación del servicio, así como la operación y rehabilitación de las fuentes de abastecimiento, redes de agua potable y alcantarillado, tanto de la ciudad como de las áreas rurales del municipio.



- Veolia Water Systems México, SA de CV lleva a cabo soluciones integrales para tratamiento de agua, venta y renta de equipos.

Como se observa en el diagrama anterior, las dos trasnacionales también han realizado operaciones conjuntas a través de sus filiales, como es el caso de Aguas de Barcelona (filial de Suez) con la compra de CIMA donde también participan ICA y la española FCC.

Las dos trasnacionales más importantes han logrado introducirse en México directamente o mediante diversas alianzas, una forma más fácil de operar en México. Ambos consorcios han desarrollado también proyectos conjuntos, por lo que se percibe un efecto de *reflejo*, es decir, lo que hace una lo realiza también la otra, un comportamiento que obedece a una estrategia de las dos trasnacionales a escala mundial, y que va encaminada no solamente a diversificar el riesgo sino que también es una forma de observación mutua para prevenir compras o movimientos de ambas empresas de forma inesperada.

## CONCLUSIONES

Los problemas que enfrenta México respecto de la distribución del agua son considerables y merecen la atención de investigadores, políticos, sociedad civil y demás. La situación que guarda el agua en México es complicada, ya que no solamente nos enfrentamos a una mala distribución física del recurso y a una creciente necesidad, sino también a los feroces apetitos de las grandes trasnacionales que, conjuntamente con los organismos internacionales, como el Banco Mundial, tienen en la mira la privatización de tan vital recurso, que se conjuga de manera favorable con una Ley de Aguas que no protege los recursos hídricos de los intereses voraces de las empresas.

En México la situación es compleja. La Conagua ha disminuido recursos humanos y financieros, por lo que no es posible abastecer y satisfacer todos los requerimientos de agua, por consiguien-

te, algunos municipios han recurrido al capital privado y se ha privatizado poco a poco el recurso, podríamos decir que casi de manera silenciosa.

Al igual que en otros países donde existen problemas de abastecimiento de agua, en México las empresas trasnacionales –ayudadas por los organismos internacionales– están presionando para la privatización de la operación de los sistemas públicos, bajo el principio de una mayor eficiencia y la falta de recursos de los gobiernos estatales. De esta manera, se cree que es posible transferir la responsabilidad de los errores del pasado y hacer invisible la carga financiera de las nuevas inversiones requeridas para la modernización y expansión de los sistemas de distribución de agua. Se considera, erróneamente, que trasladar la gestión a una entidad privada reducirá la deuda pública y sobre todo, las obligaciones futuras de endeudamiento para la creación de infraestructura y saneamiento. El agua entonces se convierte en un factor de riqueza, pero para las empresas que la administran.

Sin embargo, los organismos encargados de la privatización –o por decirlo de otra forma, de otorgar las “concesiones”– deben considerar una serie de elementos, como la disponibilidad de agua del país, las deficiencias administrativas y operativas derivadas de la constante rotación de personal en los organismos operadores cuyos gerentes permanecen en promedio menos de dos años en el cargo, la escasa capacidad de inversión –que en muchos casos no puede cubrir los costos de operación y mantenimiento–, las tarifas con frecuencia determinadas por motivos políticos clientelares –en todo caso insuficientes para enfrentar los costos de operación y mantenimiento–, las inversiones futuras y la reposición de activos, así como la falta de continuidad en la gestión –entre otras causas, debido a la corta duración de los gobiernos municipales (tres años)–, antes de pensar en la privatización. En cualquier caso, lo que se requiere, entre otras cosas, es un mejor sistema de información y participación del sector público, así como un sistema de regulación eficiente, es decir, una nueva gobernanza en materia hidráulica.

A pesar de todos los problemas que se enfrentan actualmente con el agua, el gobierno mexicano junto con los organismos inter-

nacionales, han optado por el camino de la privatización como medida que resolverá los problemas que aquejan al sector, y poco a poco han preparado el terreno para una mayor intervención del sector privado, el cual, desde luego, está ansioso por participar en un mercado recientemente abierto y donde las garantías corren por parte de los organismos internacionales y del Estado.

El Banco Mundial ha trabajado estrechamente con Suez y otras corporaciones globales del agua para presionar en la elaboración de una agenda de trabajo encaminada a la privatización del agua. Numerosos préstamos del Banco Mundial a México han incluido condiciones que obligan a la *privatización* y la *recuperación del costo total* en el caso del agua. Esto significa que la empresa privada encargada de la provisión del servicio de agua debe cubrir todos sus gastos de operación y mantenimiento mediante los cobros a los consumidores, eliminando la necesidad de un subsidio gubernamental, de ahí su ubicación en algunas ciudades que les resultan atractivas.

Por eso, uno de los riesgos mayores en esta nueva incursión del sector privado es lo que se relaciona con las tarifas, ya que todo tipo de proyecto en principio debe ser autofinanciable, de ahí que las contribuciones de los usuarios resultan importantes. Sin embargo, hay que hacer notar que no todos los mexicanos disponen de una capacidad financiera importante para poder paliar los incrementos en las tarifas acordadas con la iniciativa privada.

En nuestro caso, las trasnacionales, principalmente las francesas, han aprovechado estos espacios legales para poner en marcha tecnologías, el mercadeo y la gestión que realizan de manera constante, y se han lanzado a la conquista del mercado, con el apoyo de las instituciones internacionales y los gobiernos conservadores. Desde luego que estas empresas cuentan con el “saber hacer” que se complementa con una buena estrategia, como es la de realizar alianzas estratégicas en países en donde quieren establecerse, como es el caso de México, de tal forma que su presencia en nuestro país es incontestable.

Aquí vale la pena recordar experiencias similares que se llevaron a cabo en países como Argentina o Perú con desenlaces desastrosos, por lo que no es sorprendente que en muchos casos no se cumpla con las expectativas y la eficiencia de las políticas de privatización del agua. Por eso hoy, más que nunca, el agua debe seguir siendo un bien público.

Es imprescindible que la gestión del agua esté bajo la responsabilidad del Estado, no solamente porque se trata de un elemento vital para la población y la economía en su conjunto, sino también porque es un recurso estratégico, es el petróleo del presente siglo, el cual desde luego no debemos dejar bajo el control de tres empresas trasnacionales.

El agua es un elemento del que los gobiernos deben tener pleno control, es un bien público indispensable para la subsistencia de cualquier individuo y economía, y un mal manejo del recurso puede provocar su escasez. Sin embargo, la idea de que el agua es un bien público se ha modificado paulatinamente para considerarse cada vez más un bien que debe ser administrado y vendido por una empresa privada. La experiencia, hasta hoy, ha demostrado que los procesos de privatización en el mundo han ido en aumento, y que son solamente un puñado de empresas las que comienzan a controlar el vital líquido.

## BIBLIOGRAFÍA

- BARKIN, D. (s/f), *La gestión popular del agua: respuestas locales frente a la globalización centralizadora*, [http://www.revistafuturos.info/futuros\\_7/ges\\_agua3.htm](http://www.revistafuturos.info/futuros_7/ges_agua3.htm).
- “Calderón promete a empresarios que eliminará subsidios al agua potable” (2006), *La Jornada*, <http://www.jornada.unam.mx/2006/09/16/018n1pol.php>, consultada el 16 de septiembre.
- CEDEFNA (2005), *Boletín Informativo*, [http://csh.izt.uam.mx/cen\\_doc/cedefna](http://csh.izt.uam.mx/cen_doc/cedefna), consultada en abril.
- (2005), *Boletín Informativo*, [http://csh.izt.uam.mx/cen\\_doc/cedefna](http://csh.izt.uam.mx/cen_doc/cedefna), consultada en marzo.

- CONAGUA (2006), *Estadísticas del agua en México*, México, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- ¿Está en venta el agua de México?, *Multinacional francesa quiere el agua de México*, [www.citizen.org/cmep/Water/cmep\\_Water/reports/mexico/articles.cfm?ID=10417](http://www.citizen.org/cmep/Water/cmep_Water/reports/mexico/articles.cfm?ID=10417), consultada en 21 de enero de 2009.
- [www.citizen.org/cmep/Water/cmep\\_Water/reports/mexico/articles.cfm?ID=10417](http://www.citizen.org/cmep/Water/cmep_Water/reports/mexico/articles.cfm?ID=10417), consultada en 21 de enero de 2009.
- [www.suez.com](http://www.suez.com), consultada en 21 de enero de 2009.
- GONZÁLEZ A., Roberto (2005), “Fox, «agresivo» promotor de esa política diseñada en el BM: experta”, *La Jornada*, México.
- GUILLÉN, A. (2000), *México hacia el siglo XXI. Crisis y modelo económico alternativo*, México, UAM-Plaza y Valdés.
- “Inversión de la IP para enfrentar crisis del agua, plantea Calderón” (2008), *La Jornada*, consultada el 15 de junio, p. 3.
- LAIMÉ, M. (2003), *Le dossier de l'eau*, Francia, Ed. Seuil.
- La Jornada* (2005), “Solicita el gobierno federal al BM estrategia para privatizar el agua”, México, 17 de junio, p. 52.
- LASSERRE, F. y L. Descroix (2005), *Eaux et territoires*, Québec, Presses de l'Université du Québec.
- MARTÍNEZ, O.C. (2002), *La gestión privada de un servicio público. El caso del agua en el Distrito Federal, 1988-1995*, México, Ed. Plaza y Valdés.
- MONTERO, D. (2004), “El agua en América del Norte”, *Revista Denarius*, México, UAM-Iztapalapa, en prensa.
- *et al.* (2005), “El ambiente: aire, agua y áreas verdes”, en R. Rosales, y D. Montero (coords), *Diversidad urbana, política y social en Iztapalapa*, México, UAM.
- PINSENT, M. (2007), *Water Yearbook, 2006-2007, The essential guide to the water industry from leading infrastructure law firm Pinsent Masons*, Inglaterra, [www.pinsentmasons.com](http://www.pinsentmasons.com).
- “Promagua, pagar para privatizar” (2006), *El Financiero*, 17 de julio.
- TUDELA, F. (2004), *Los síndromes de sostenibilidad del desarrollo. El caso de México*, Santiago de Chile, CEPAL.



GRACIELA CARRILLO GONZÁLEZ\*  
Y ROBERTO CONSTANTINO TOTO\*\*

## *El manejo del recurso hídrico, ¿escasez o un modelo de gestión inadecuado en México?*

### INTRODUCCIÓN

LA FALTA DE CERTIDUMBRE sobre el abasto de agua constituye un factor de inseguridad tanto individual como en la dimensión social. Se escucha cada vez con mayor frecuencia que “el mundo se está quedando sin agua” o que en ciertas regiones del planeta la tasa de mortalidad aumenta debido a la escasez de este recurso. Sin embargo, la escasez resulta ser un factor tanto engañoso como restrictivo cuando se analiza el problema de agua como un asunto de seguridad.

Es engañoso porque en muchos casos tal escasez es en realidad el resultado de una mala gestión de los recursos hídricos, pero también es un factor restrictivo porque la disponibilidad del agua es sólo una dimensión de lo que podría ser un escenario real de inseguridad para la sociedad.

La escasez física de agua, se define como la insuficiencia del recurso para satisfacer la demanda. Esto puede ser una característica real en ciertas regiones del mundo, pero la escasez absoluta que pudiera generalizarse a nivel planetario es en realidad una excepción, ya que son otros los aspectos que pueden determinar el desabasto. La mayoría de los países tiene suficiente agua como para satisfacer las necesidades de la población, tanto en los hogares y las industrias, como para el sector agrícola, sin embargo,

\* Profesora-investigadora del Departamento de Producción Económica. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco.

\*\*Profesor-investigador del Departamento de Producción Económica. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco.

el problema suele centrarse en un asunto que es la gestión adecuada del recurso, que responde a una visión dispendiosa que hasta hace poco consideraba al agua como un recurso disponible e infinito.

En este trabajo se pretende discutir el problema del agua a partir de dos visiones: aquella que sugiere como presente la escasez física del recurso y su posible agotamiento en años venideros, y por otro lado, el argumento de que, a pesar de que existe una distribución adversa del recurso en términos de disponibilidad y acceso, tiene mayor peso la mala gestión que del recurso hacen los organismos operadores y el propio Estado.

En el primer apartado se expone y se discute la importancia y disponibilidad del agua a escala mundial y particularmente en México, para analizar posteriormente lo que ha sido el modelo de gestión del agua en el país, y finalmente, establecer algunas consideraciones al respecto.

#### IMPORTANCIA Y DISPONIBILIDAD DE AGUA

EL AGUA es, sin lugar a duda, uno de los recursos naturales más importantes ya que es indispensable para la realización de toda actividad económica y para la vida misma. El riesgo de una eventual escasez de este recurso es cada vez mayor; ésta se puede dar física, económica o institucionalmente. Ello se explica frente a una distribución desigual del recurso en las distintas regiones y por una asignación ineficiente de las instituciones u organismos gestores.

Sin embargo, no es posible perder de vista que, independientemente de los parámetros de distribución y los esquemas de gestión, que quizá no sean óptimos, el agua es un recurso finito. El agua dulce, disponible para uso humano, es apenas 2.5% del total de agua en el planeta y tan sólo 1% del agua en el mundo, disponible en lagos y ríos, es de fácil acceso.

En algunos trabajos (Dávila, 2006), se afirma que la escasez física del recurso no es tal; se presentan datos de la UNESCO que



calculan una disponibilidad promedio de agua en el planeta de 577,000 km<sup>3</sup>/año, de los cuales menos de 10% proviene del agua de lluvia, que es la recarga de las fuentes hídricas superficiales, y tan sólo alrededor de 5% es extraída para consumo humano y para la producción.

1. Es evidente que las diferencias en la disponibilidad del recurso están marcadas por un lado, por las características topográficas y climatológicas que prevalecen en las diversas regiones del mundo y que determinan que en regiones como el norte de África o el centro de Asia se padezca una situación extrema de escasez, mientras que otras regiones cercanas a la franja ecuatorial enfrentan problemas de inundaciones.
2. Por otro lado, está presente el tipo de política que los gobiernos toman para establecer el sistema de administración que da lugar al abasto de agua de los distintos sectores sociales y económicos, lo cual se topa con una serie de problemas, dado que el agua, a diferencia de los alimentos o el petróleo, no se puede transferir fácilmente en cantidades por bloque y su comercialización tiene un alcance limitado para compensar los desequilibrios, por lo tanto, lo que se vuelve importante es la disponibilidad y el acceso a escala local entre las poblaciones a través de la infraestructura hídrica.

Aproximadamente 1,100 millones de personas, es decir, 18% de la población mundial, no tienen acceso a fuentes seguras de agua potable, y más de 2,400 millones carecen de saneamiento adecuado. En los países en desarrollo, más de 2,200 millones de personas, la mayoría niños, mueren cada año a causa de enfermedades asociadas con la falta de acceso al agua potable, saneamiento inadecuado e insalubridad (PNUMA, 2000).

Por desgracia, las lluvias son altamente estacionales y excepcionalmente variables a lo largo del tiempo y del espacio. Combinada con una infraestructura limitada para el almacenamiento y unas cuencas hidrográficas deficientemente protegidas, esta

variabilidad expone a millones de personas a la amenaza de sequías e inundaciones.

La escasez de agua dulce es uno de los siete problemas ambientales fundamentales presentados en el Informe *Perspectivas del medio ambiente mundial* del PNUMA. Es más, en una encuesta realizada a 200 científicos lo señalaban, junto al cambio climático, como el principal problema del nuevo siglo.

Dentro del escenario descrito, aparecen dos elementos adicionales: el crecimiento poblacional, así como los hábitos de consumo y cuidado del agua. En forma sencilla, se puede decir que estamos alcanzando el límite de extraer agua dulce de la superficie terrestre, pero el consumo no deja de aumentar. Sin embargo, una gran amenaza surge al considerar un tercer elemento, el cambio climático tendrá algún efecto sobre el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua dulce, que se puede traducir en agravar las condiciones de escasez de las zonas que ya son áridas (menos lluvias y mayor evaporación).

Actualmente, 20% de la población en el mundo no tiene acceso a agua de calidad suficiente y 50% carece de saneamiento. África y Asia occidental son las zonas de mayor carencia. De forma simplificada, podríamos decir que en los países desarrollados el problema del agua afecta sobre todo a la conservación de la naturaleza y a las posibilidades de crecimiento económico, mientras que en los países en desarrollo, la falta de agua potable genera otro tipo de problemas, como enfermedades gastrointestinales (diarrea y cólera) que causan la muerte de 15 millones de niños cada año.

En aproximadamente 100 años el consumo de agua dulce en el planeta se ha incrementado seis veces, mientras que la población aumentó de 1,600 millones en 1900 a 6,000 millones en el año 2000 (cuatro veces más); esto refleja un ritmo de crecimiento de la población menor al ritmo al que ha crecido el consumo de agua. Se suma entonces un elemento más, el derroche como ingrediente dentro de los patrones de consumo. La agricultura se lleva 70% de agua dulce, consumida por el uso de técnicas de riego inapropiadas. El consumo industrial que suele “regularse”

por eficiencia económica, y se estima que se duplicará para el año 2050, básicamente por la rápida industrialización de países como China, y el consumo doméstico también aumenta con la renta per cápita, sobre todo en usos recreativos (campos de golf, parques y jardines, etcétera) y derivados del turismo.

El consumo de agua en algunas áreas ha tenido impactos drásticos en el medio ambiente. En regiones de Estados Unidos, China y la India, se consume agua subterránea con más rapidez de la que se repone, y los niveles hidrostáticos disminuyen constantemente. Algunos ríos, tales como el Río Colorado, en el oeste de Estados Unidos, y el Río Amarillo, en China, con frecuencia se secan antes de llegar al mar.

Por otro lado, la pérdida de calidad del agua dulce por contaminación repercute gravemente en su disponibilidad para consumo, una vez superada la capacidad natural de autodepuración de los ríos. En primer lugar, la contaminación difusa de origen agropecuario derivada del uso incontrolado de plaguicidas tóxicos y fertilizantes (nitrógeno y fósforo) produce la eutrofización (crecimiento excesivo de algas y muerte de los ecosistemas acuáticos) pero también llega a causar enfermedades cancerígenas debido a las altas concentraciones que se dan en algunos lugares. En segundo lugar, la contaminación industrial por metales pesados, materia orgánica y nuevos compuestos tóxicos, y por último, la contaminación doméstica producida en las grandes ciudades.

Otro gran problema a escala mundial es la contaminación de las aguas subterráneas, las cuales constituyen 97% del agua dulce y se ven amenazadas por la contaminación de los acuíferos, la mala utilización de los pozos y la sobreexplotación de los mismos, que provoca en las zonas costeras que el agua del mar penetre y salinice los acuíferos subterráneos (como ocurre en el litoral mediterráneo).

Aun cuando el riego agrícola continúa siendo la actividad que demanda mayor uso del agua, a partir del siglo xx, el agua utilizada por la industria y por los municipios ha ido en aumento. Ahora el consumo per cápita es cada vez mayor, y ése suele ser

un argumento más para hablar de la escasez del recurso y la posible insuficiencia de agua en el futuro. Los modelos de uso del agua también han cambiado.

Debido a que los suministros de agua dulce son el elemento esencial que permite la supervivencia y el desarrollo, también han sido, a veces, motivo de conflictos y disputas, pero a la vez, son una fuente de cooperación entre personas que comparten los recursos del agua. A la par del aumento de la demanda del líquido vital, las negociaciones sobre la asignación y administración de los recursos del agua son cada vez más comunes y necesarias.

## EL AGUA EN MÉXICO

MÉXICO es un país con un territorio de dos millones de kilómetros cuadrados y con más de 11,000 kilómetros de litoral. Su población es de alrededor de 100 millones de habitantes y a principios de este siglo, contaba con una disponibilidad promedio de agua de  $4,547\text{m}^3$ , que lo ubica como un país de baja disponibilidad frente al promedio de  $38,562\text{m}^3$  en América Latina,  $15,369\text{m}^3$  en Estados Unidos y  $8,576\text{m}^3$  en Europa (Carrillo y Tafoya, 2006).

México tiene buenos antecedentes en cuanto a la gestión del agua en muchas regiones, pero en las zonas norte y central del país, la demanda de agua para riego y para actividades industriales está sobrepasando a la oferta y es con la extracción de agua subterránea como se ha cubierto esta brecha.

En el país se cuenta con 37 regiones hidrológicas y 718 cuencas, la precipitación promedio anual es de 771 mm y el promedio de escurrimiento natural medio superficial es de  $386,000\text{ hm}^3/\text{año}$ . En este escenario, encontramos que la distribución del agua disponible en el país es muy desigual, así como la capacidad de captación, lo que lleva a que se clasifiquen dos terceras partes del país en regiones con muy baja captación de los escurrimientos, como zonas desérticas y semidesérticas; paradójicamente, en estas regiones es donde se ubica la mayor superficie de agricultura comercial, y por tanto, donde el riego se convierte en un recurso vital.

En el contexto arriba señalado, cabe destacar que la agricultura representa 77% del uso del agua en México; los cultivos de regadío representan más de la mitad de la producción agrícola total y aproximadamente las tres cuartas partes de las exportaciones, dominadas por productos de riego intensivo, como por ejemplo, diversas frutas, verduras y el ganado. El agua subterránea en la actualidad representa un porcentaje estimado de 40% del uso total del agua para la agricultura, pero más de 100 de los 653 acuíferos del país son sobreexplotados, lo cual causa un daño ambiental considerable y socava la actividad de los pequeños productores agrícolas.

La extracción en exceso, alentada por los subsidios a la electricidad, es una amenaza para la productividad agrícola a largo plazo. En Sonora, el acuífero costero de Hermosillo proporcionaba agua a una profundidad de aproximadamente 11 metros en la década de 1960. Hoy en día, las bombas extraen agua desde una profundidad de 135 metros, lo que no sería rentable si la electricidad no se encontrara subsidiada, es decir, que los incentivos perversos para la explotación en exceso afectan gravemente, ya que los costos de extracción del agua subterránea dependen de los gastos de inversión en bombas y del gasto periódico en electricidad; una vez que se instala la bomba, la única limitación para el bombeo es el precio de la electricidad.

Además, el bombeo en exceso ha ocasionado intrusión de agua salada y pérdidas de tierras aptas para la actividad agrícola. Las agroindustrias que se dedican a la exportación ahora se trasladan hacia el interior desde las zonas costeras más afectadas, para poder explotar nuevas fuentes.

Al subvencionar el consumo, los subsidios a la electricidad mantienen artificialmente alta la demanda de agua. Los análisis econométricos sugieren que retirar el subsidio llevaría a que tres cuartas partes de los regadíos adopten prácticas más eficientes, por ejemplo, sistemas de riego con aspersores. También ofrecería un incentivo a los productores agropecuarios para dedicarse a cultivos que sean menos intensivos en cuanto al uso de agua. El

ahorro general de agua representaría aproximadamente una quinta parte del uso actual (PNUD, 2006).

El problema, como en el resto del mundo, no es únicamente que se destine más de 70% del líquido disponible para esta actividad sino que la mayoría de los sistemas de irrigación son ineficientes; en ellos se pierde alrededor de 60% del agua por la evaporación o reflujo a los ríos y mantos acuíferos. La irrigación ineficiente promueve el desperdicio de agua y también provoca riesgos ambientales y de salud, tales como la pérdida de tierra agrícola productiva debido a la saturación.

En el caso de la industria, se puede llegar a considerar el sector más demandante si se incorpora a la industria hidroeléctrica, sin embargo, ésta realiza un uso no consuntivo del agua al retornarla a las fuentes de agua sin merma ni contaminación aparentes. El uso consuntivo del agua en aquella industria lo realizan las termoeléctricas, como grandes demandantes de agua, y la industria manufacturera, con una demanda de menos de 4% del agua suministrada al sector secundario (Rodríguez y Morales, 2006).

En cuanto al uso doméstico, el problema adquiere dimensiones de carácter físico, político, social, económico, de salud pública y ambiental, ya que existe una presión muy alta sobre el recurso hídrico en ciertas regiones, como el Valle de México. Hay fuertes desigualdades y baja calidad en la cobertura de los servicios de agua potable y graves deficiencias en el tratamiento de las aguas residuales.

La carencia de agua potable se debe tanto a la falta de inversiones en sistemas de agua como al mantenimiento inadecuado. Cerca de 50% del agua en los sistemas de suministro de agua potable se pierde por fugas, conexiones ilegales y vandalismo, generalmente las personas en una mejor situación económica son las que se ven privilegiadas y consumen los mayores volúmenes de agua, mientras que la gente pobre que no está conectada al sistema depende de vendedores privados costosos o de fuentes inseguras.

## EL MODELO DE GESTIÓN: DE UNA VISIÓN DE OFERTA A UNA VISIÓN DE DEMANDA

EN SU etapa inicial, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) administró el recurso considerando el total de las entidades federativas, agrupadas en seis regiones administrativas. Durante la segunda mitad de la década de 1990 y en atención a un diagnóstico hidráulico del país, la Conagua se reestructuró estableciendo administrativamente dos ámbitos: el central, a través del Consejo Técnico, y el regional, a través de los Consejos de Cuenca.

La estructura de la Conagua a partir de esos años opera con base en la delimitación de las cuencas, considerando aspectos de cantidad y calidad, tanto de aguas superficiales como de aguas profundas; se asume también el principio de conciliación de conflictos a través del fortalecimiento de los Consejos de Cuenca.

Así, en 1998 la Conagua opera en 314 cuencas que se agrupaban en 72 subregiones y en 39 regiones hidrológicas, todas ellas comprendidas en los Consejos de Cuenca. Éstos posteriormente se convierten en Gerencias Regionales Administrativas y a partir de 2004, con la nueva Ley de Aguas Nacionales, se les denomina Organismos de Cuenca, los cuales operan con carácter autónomo adscritos directamente al titular de la Conagua y se conciben como instancias de apoyo, consulta y asesoría entre la institución y las dependencias de las instancias federal, estatal y municipal.

A la fecha operan alrededor de 25 Organismos de Cuenca, que son los responsables de administrar y preservar las aguas nacionales en cada una de las 13 regiones hidrológico-administrativas en que se ha dividido el país. Las regiones y sus sedes son:

- I. Península de Baja California (Mexicali, Baja California).
- II. Noroeste (Hermosillo, Sonora).
- III. Pacífico Norte (Culiacán, Sinaloa).
- IV. Balsas (Cuernavaca, Morelos).
- V. Pacífico Sur (Oaxaca, Oaxaca).
- VI. Río Bravo (Monterrey, Nuevo León).

- VII. Cuencas Centrales del Norte (Torreón, Coahuila).
- VIII. Lerma-Santiago-Pacífico (Guadalajara, Jalisco).
- IX. Golfo Norte (Ciudad Victoria, Tamaulipas).
- X. Golfo Centro (Jalapa, Veracruz).
- XI. Frontera Sur (Tuxtla Gutiérrez, Chiapas).
- XII. Península de Yucatán (Mérida, Yucatán).
- XIII. Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala (Estado de México, DF).

Las tareas fundamentales que desempeñan estos Organismos de Cuenca son: determinar la disponibilidad del agua; orientar los nuevos polos de desarrollo; lograr el uso sustentable del agua; asegurar la preservación de los acuíferos; garantizar la calidad del agua superficial; llevar a cabo la recaudación en materia de aguas nacionales y sus bienes; solucionar conflictos relacionados con el agua; otorgar concesiones, asignaciones y permisos; promover la cultura del buen uso y preservación del agua; prevenir los riesgos y atender los daños por inundaciones; prevenir los riesgos y atender los efectos por condiciones severas de escasez de agua, y operar la infraestructura estratégica.

Otro elemento fundamental que se incorporó en el proceso de administración del agua dentro del Plan Nacional Hidráulico 2000-2006 fue el fortalecimiento de la participación social en los Organismos de Cuenca, que se opera a partir de los foros de concertación entre los distintos órdenes de gobierno y los distintos grupos de usuarios organizados.

La primera etapa de administración del agua en el país se identificó como un modelo de “gestión de la oferta”, en la cual se impuso una visión donde la problemática hídrica podría encontrar salida a partir de la propuesta de obras, de modo que una vez realizada la obra, se esperaba que se generaran las relaciones sociales necesarias que propiciaran la interacción de las instituciones involucradas en la zona. En ese enfoque no se consideraba la posibilidad de participación de agentes diversos con opiniones alternativas. El desarrollo de los grandes programas se dio bajo un esquema totalmente lineal que se dictaba desde la cúpula de



la burocracia hidráulica hacia el grupo de los ingenieros hidráulicos que manejaron las obras, durante varias décadas, de manera muy centralizada. Con esta visión no hubo estudios ambientales ni sociales que influyeran en las decisiones tecnológicas.

La transición de ese enfoque se presenta con la participación de profesionales del área económica con la estimación costo/beneficio de los grandes proyectos, quienes para la década de 1980 ya se percataban de los límites para la expansión de la superficie de riego y las dificultades para identificar sitios donde se pudiera construir la gran infraestructura.

Hacia 1986 se crea el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), donde surgen nuevos enfoques de análisis que ya incorporan planteamientos sobre conflictos futuros por el agua, las tarifas de agua y la necesidad de la participación de los agricultores en el manejo y operación de sus sistemas.

En pocos años, tanto el IMTA como la Conagua empezaron a mostrarse más innovadores y fueron contratando sociólogos, comunicólogos, antropólogos, entre otros profesionales de las ciencias sociales. En particular el IMTA logró conformar un esquema más multidisciplinario, con lo que se dio pie a una transformación en la gestión del agua con la reestructuración administrativa de las instancias responsables.

El modelo económico que priva hacia finales de la década de 1980 permea el ámbito institucional a través de una política privatizadora y de descentralización de la administración pública para equilibrar las funciones de las distintas instancias gubernamentales y transformar las bases del ejercicio administrativo. La convicción del gobierno de que un reajuste económico, la disminución del gasto público, la participación más activa del sector empresarial y la privatización de las empresas públicas permitirían alcanzar un camino económicamente exitoso se manifestó en nuevas políticas de gestión que llegaron también al sector hídrico.

Con la creación de la Conagua, se iniciaron importantes transformaciones, como la transferencia de los sistemas de riego, la reorganización de los derechos de agua y la creación del Registro Público de Derechos de Agua (Repda). Se propone la autogestión

financiera de las organizaciones encargadas del manejo y administración del agua considerando la inclusión de capital privado para reducir con ello los gastos del Estado y a todos estos elementos se suma un enfoque participativo que sienta las bases de un nuevo modelo de gestión: “la gestión de la demanda”.

El proceso de descentralización seguido para este sector consideró como estrategias fundamentales: la promulgación de una nueva Ley de Aguas Nacionales, el fortalecimiento de la Conagua y de los consejos que atenderían a escala federal y regional, la promoción de organizaciones de usuarios para descentralizar el servicio de agua, el establecimiento de un sistema de intercambio de derecho de uso del agua para dar seguridad a usuarios e inversionistas, el reforzamiento de los sistemas de financiamiento, la planificación del manejo de aguas superficiales y subterráneas, el respaldo a un programa de desarrollo tecnológico y la promoción de una nueva cultura del agua (Dávila, 2006).

Las estrategias de la nueva gestión del agua se consolidaron con la transferencia de programas y proyectos, que hasta entonces operaba la Conagua, a los estados y municipios. Este paquete inicia en 1996 en dos bloques:

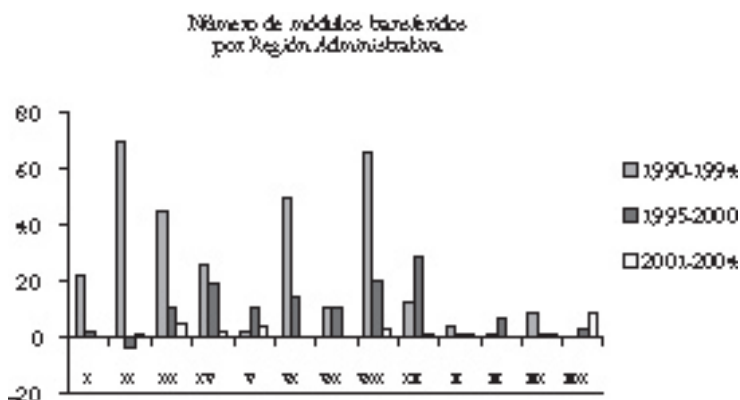
Hacia el sector agrícola se transfieren cuatro programas, a saber: 1) uso eficiente del agua y la energía eléctrica; 2) uso pleno de la infraestructura hidroagrícola; 3) rehabilitación y modernización de los distritos de riego; y, 4) desarrollo parcelario.

Dirigidos al agua potable se transfiere: 1) agua potable y alcantarillado en zonas urbanas; 2) programa para la sustentabilidad de los servicios de agua potable y saneamiento en comunidades rurales; 3) agua limpia; 4) control de malezas acuáticas en cuerpos de agua (Conagua-Semarnat, 2000).

Los procesos de ambos bloques se desarrollaron mediante los Acuerdos de Coordinación entre la Conagua y los gobiernos de los Estados. En el primer caso, se canalizaron recursos a los fideicomisos estatales con Banrural como fiduciario; en el segundo, los recursos se otorgaron a los organismos operadores, como prestadores del servicio, por medio de la Tesorería de la Federación.

En el 2005, se había transferido ya 98% de la infraestructura hidroagrícola (464 distritos), comprendidos en las 13 regiones administrativas (véase gráfica), mismos que atendía a 3.42 millones de hectáreas en 78 distritos, y faltaban únicamente cuatro distritos que no habían sido transferidos aún, como se observa en el cuadro de la página siguiente.

### TRANSFERENCIA DE MÓDULOS DE LOS DISTRITOS DE RIEGO, 1990-2004



Fuente: Carrillo y Tafoya, 2006.

El proceso de transferencia modificó la política de manejo de riego llevada hasta entonces y buscó una salida a la falta de recursos gubernamentales.

La estrategia de transferencia se aplicó en dos etapas; primero, se zonificaron los distritos en uno o varios módulos de riego de acuerdo con sus características operativas, en tanto que se invitó a los usuarios a organizarse en una asociación civil para poder concesionar a cada asociación un volumen de agua y transferirle la operación, conservación y administración de las redes secundarias de distribución del agua, la de drenaje y la de caminos, que están dentro del módulo, mientras que la Conagua continuó operando, conservando y administrando las obras de cabecera, redes mayores de canales, drenes y caminos.

## DISTRITOS DE RIEGO QUE NO HABÍAN SIDO TRANSFERIDOS HASTA EL 2005

<i>Clave</i>	<i>Distrito de riego</i>	<i>Entidad federativa</i>	<i>Porcentaje transferido</i>
003	Tula	Hidalgo	50
018	Colonias Yaquis	Sonora	83
019	Tehuantepec	Oaxaca	71
100	Alfajayucan	Hidalgo	79

Fuente: Gerencia de Distritos y Unidades de Riego. SGIH, Conagua (2005).

Se consideró, desde un inicio, que en una segunda etapa se les podría transferir la administración y operación del resto de la infraestructura, obras de captación, obras estratégicas y las redes primarias, una vez que adquirieran experiencia en la administración.

Se han identificado problemas de organización entre los usuarios, no obstante se percibe una mejora relativa en el cuidado de la infraestructura en varios distritos y la contribución financiera de los usuarios, al menos para el manejo y mantenimiento, aunque están lejos de la autosuficiencia y aún persisten los problemas de baja eficiencia de conducción y salinidad en los suelos que se deriva de los sistemas de drenaje predominantes. Asimismo, la infraestructura de control y medición es insuficiente. Dadas las limitadas posibilidades de inversión, sigue ocurriendo, lo que repercute en una sobreexplotación de los acuíferos y un manejo no sustentable.

La respuesta institucional ha sido establecer un convenio de concertación desde 1996 con la Asociación Nacional de Usuarios de Riego, donde las asociaciones de los distritos transferidos y los gobiernos de los estados participan con 50% en los trabajos de rehabilitación y modernización de la infraestructura hidráulica. Para 2007-2008, se planteó invertir cerca de 15,000 millones de pesos, de los cuales el gobierno aportaría 9,000 para modernizar y hacer más eficiente el uso de agua en distritos de riego. La meta para el 2025 es rehabilitar y modernizar la infraestructura que atiende a 3.06 millones de hectáreas y reducir el uso de agua en

5,300 millones de metros cúbicos con una inversión de 24,200 millones de pesos.

Con respecto al agua potable, el derecho para la explotación y aprovechamiento que anteriormente sólo se asignaba a los municipios y dependencias locales, como las Juntas, Comités o Consejos de Agua, con la nueva gestión el gobierno federal estipuló que los derechos de asignación podían ampliarse para que se diera en concesión el servicio de agua potable y saneamiento a los organismos operadores, públicos y privados, definidos por la Conagua como aquellos organismos descentralizados de la administración pública con personalidad jurídica, patrimonio propio y funciones de autoridad administrativa. El objetivo de este tipo de concesiones es el mejoramiento en cantidad y calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento con recursos propios y de los gobiernos federal y estatal.

Con la idea de que estos organismos lograrían sanear económica y administrativamente el servicio de agua potable, se perdió de vista que, en el caso de los privados, su lógica empresarial tiene como objetivo la eficiencia pero también el incremento de su ganancia y que con el tiempo, por encima del servicio al usuario, la prioridad ha sido afiliarse a trasnacionales, como Aguas de Barcelona, Suez, Aguas de Tunari u otras que les garanticen dicha ganancia.

La discusión que se sostiene en diversos ámbitos plantea la conveniencia de poner el servicio en manos de operadores públicos o privados. El servicio a los usuarios se ha expuesto a la ineficiencia y corrupción o a la sobreexplotación del recurso para satisfacer las expectativas de ganancia de los operadores.

## CONSIDERACIONES FINALES

EL TEMA de la escasez de agua en el ámbito internacional y nacional es un asunto relativo. Si bien es cierto que existen regiones con fuertes carencias del recurso, en términos globales la disponibilidad de agua dulce en el planeta y en el país permitiría cubrir las necesidades básicas de la población.

Sin embargo, a esa escasez relativa se asocian diversos factores que tienen que ver con los patrones de consumo que revelan una tasa de crecimiento del consumo de agua superior a la tasa de crecimiento de la población, y por otro lado, las prácticas y políticas derivadas de un modelo neoliberal han delegado al sector empresarial la función del manejo, distribución y saneamiento del agua a los propios usuarios, en el caso del sector agrícola, y a organismos operadores, en el caso del servicio urbano.

La Conagua, en su actual visión modernizadora, carece aún de mecanismos de regulación que garanticen el buen manejo y la gestión adecuada del recurso hídrico por parte de los distintos agentes. Si bien es cierto que la participación y el consenso social han mostrado sus bondades, también es cierto que la descentralización y la privatización a ultranza de uno de los recursos estratégicos y vitales para cualquier país representa un grave riesgo a futuro.

## BIBLIOGRAFÍA

- CARRILLO, G. y S. Tafoya (2006), "El agua en el sector agropecuario mexicano", en R. Constantino (coord.), *Agua, seguridad nacional e instituciones. Conflictos y riesgos para el diseño de las políticas públicas*, México, Senado de la República-ILSEN-UAM.
- CETEMAC (2003), *El recurso hídrico en México. Análisis de la situación actual y perspectivas futuras*, México, Miguel Ángel Porrúa-CETEMAC-Fund. Nipona.
- CNA (2004), *Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento*, México, CNA.
- \_\_\_\_\_ (2001), *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*, México, CNA.
- CNA-Semarnap (2004), *Estadísticas del agua en México*, México, CNA.
- \_\_\_\_\_ (2004), *Programa de Transferencia de Distritos de Riego*, México, CNA.
- CONSTANTINO, T.R. (2006), *Agua, seguridad nacional e instituciones. Conflictos y riesgos para el diseño de las políticas públicas*, México, Senado de la República-ILSEN-UAM.
- DÁVILA, S. (2006), *El poder del agua*. México, Itaca.
- JACOBO-VILLA, M.A. y Elsa Saborío (2004), *La gestión del agua en México. Los retos para el desarrollo sustentable*, México, Miguel Ángel Porrúa-UAM.

PNUD (2006), *Informe anual sobre desarrollo humano*.

PNUMA (2000), *Perspectivas del medio ambiente mundial 2000*, Ed. Mundi-Prensa.

RODRÍGUEZ, T.L. y N.J.A. Morales (2006), “Perspectivas de seguridad nacional: el agua y la estructura industrial en México”, en R. Constantino (coord.), *Agua, seguridad nacional e instituciones. conflictos y riesgos para el diseño de las políticas públicas*, México, Senado de la República-ILSEN-UAM.





Segunda parte

*Sustentabilidad y cultura del agua*



ERNESTINA I. ZAPIAIN GARCÍA\*  
Y ALFONSO S. ÁLVAREZ MOSQUEDA\*\*

## *¿Cómo construir una cultura del agua? Proyecto de manejo sustentable*

### INTRODUCCIÓN

PARA LOGRAR EFECTIVIDAD en la política del manejo eficiente del agua, no basta con la tarea de generar información, si se tiene como objetivo un cambio de actitud, tanto en los servidores públicos como en los ciudadanos, lo que se requiere es crear una nueva cultura.

Esto implica la adopción generalizada de una metodología para producir el cambio en las conductas que, expuesta de una manera sucinta, considera al individuo como un sistema que se constituye con los hábitos, costumbres, principios, comportamientos y su historia individual, en la cual hay percepciones, valores, motivos y expectativas.

A partir de ahí, se integran los cuatro factores de la cultura propuestos en este modelo, que son: comunicación, identidad, cultura y acción (Van Riel, 1998: 2). Esta última determina la cultura de relaciones, la gestión eficaz y el cambio.

### MODELO PARA CONSTRUIR UNA CULTURA DEL AGUA CON VALORES COMPARTIDOS

PARA poder presentar una propuesta metodológica acerca de cómo construir una nueva cultura, es necesario elaborar un diagnóstico de la comunicación, la identidad, la cultura y las acciones que se

\* Profesora del Departamento de Economía de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.

\*\* Investigador independiente.

han llevado a cabo hasta este momento, para lograr una actitud responsable en la ciudadanía en general sobre el manejo y uso del agua, y medir el efecto.

Toda actividad de la comunicación debe estar integrada (Van Riel, 1998: 18) para poder alcanzar los objetivos y metas planteadas, ésta tiene cuatro funciones:

1. Reforzar las operaciones centrales internas (Comisión Nacional del Agua, organismos operadores, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) y externas (instituciones y organizaciones civiles, así como fundaciones, instituciones educativas, entre otras).
2. Difundir ampliamente la necesidad del uso y manejo eficiente del agua (persuadir).
3. Enterar a los usuarios y empleados para promover la retroalimentación (informar y ser informado).
4. Socializarlos en los objetivos comunes (integrar).

Por consiguiente, se propone:

- Utilizar las herramientas que permitan un cambio de actitud de los poseedores de la información, esto es, los funcionarios de las entidades públicas en todos los niveles de gobierno y en los sectores sociales.
- Promover la capacitación y la inducción entre los servidores públicos responsables acerca de los valores del uso y manejo del agua, con base en acuerdos de coordinación con otras instituciones gubernamentales federales, estatales y municipales.
- Referido a la sociedad en general, promover sistemáticamente mesas redondas y encuentros de suficiente amplitud y difusión, para ventilar los casos puntuales de acierto y fallas en la operatividad de la política del manejo y uso del agua, para establecer un ciclo de mejora continua que permita atender áreas de oportunidad en la materia.

Las acciones de contacto directo entre funcionarios y representantes de la sociedad, cara a cara (Van Riel, 1998: 20) tienen mayor efectividad y mejores resultados, porque implican retroalimentación y respuesta, elementos que contribuyen al cambio de actitud y a la formación de una cultura socializada (Abravanel *et al.*, 1992: 95).

Para lograr un cambio, es necesario transformar hábitos, costumbres y creencias de la población en general (Parting, 1993: 30), y si ésta no participa en la discusión de la problemática referida a la situación real de su comunidad en cuanto a:

- a) Agua potable
- b) Drenaje
- c) Alcantarillado
- d) Pagos
- e) Ampliación de cobertura
- f) Mantenimiento de instalaciones
- g) Mantenimiento de tuberías, tinacos, etcétera.
- h) Control del desperdicio
- i) Contaminación
- j) Limpieza del agua
- k) Uso racional del agua, etcétera.

No se involucra y por lo tanto, no se compromete a realizar acciones correctivas o propuestas de mejora en el manejo del agua en general.

Si bien hay programas de información y difusión dirigidos a la población en general, y algunos programas específicos para sensibilizar a los niños en las escuelas, éstos se han quedado en el plano informativo en el que se difunden mensajes sin tener realmente receptores que se hagan conscientes de ellos y que finalmente contribuyan o participen en planteamientos que solucionen la problemática, ya que no existe ningún programa en el que se les involucre para proponer esos planteamientos e incluso realizarlos. Por lo tanto, la mayor parte de los programas, siendo exclusiva-

mente informativos, en muchas ocasiones han creado resistencia al cambio.

La resistencia al cambio (Lippitt *et al.*, 2001: 133) es una reacción esperada por parte del individuo, el cual, estando en un periodo de equilibrio, percibe la amenaza de la inestabilidad e incertidumbre que acarrearán consigo las modificaciones. Por tanto, se puede definir como aquellas fuerzas restrictivas que obstaculizan un cambio.

## ETAPAS DEL CAMBIO

SE HA señalado que para lograr el cambio de actitud es necesario que el individuo transite ayudado por un experto denominado “agente de cambio” (Audirac, 1994: 43) por tres etapas, a saber:

### *Descongelamiento*

Donde la sensación de los individuos ante una propuesta diferente a los hábitos y costumbres que ha seguido en su comportamiento cotidiano y tradicional será de:

- Desequilibrio
- Insatisfacción
- Toma de conciencia de la situación
- Procedimientos, hábitos, costumbres, actitudes que obstaculizan la adaptación
- Ansiedad
- Dudas del propio modo de conducirse.

La necesidad de:

- Identificar las estructuras sujetas a cambio
- Satisfacer nuevas necesidades
- Equilibrio
- Lograr la situación deseada.

Precisamente en esta etapa se plantea la propuesta de promover e informar a la población acerca de las medidas que se requieren para lograr el uso sustentable del agua en sus poblaciones y así en la siguiente etapa orientar el desconcierto y desequilibrio, así como la ansiedad y las dudas en la búsqueda de guía y dirección acerca de lo que se debe hacer ante el diagnóstico de los hechos que acontezcan en su entorno más cercano referidos a la problemática del uso eficiente del agua.

### *Transformación o movimiento*

En esta etapa, la sensación de los individuos que ya han sido informados y que han participado en mesas redondas, sesiones, foros, y demás, seguirán presentando:

- Desequilibrio
- Falta de estructura
- Inestabilidad
- Inseguridad
- Incertidumbre.

Por lo que las conductas que presentan significan un grado mínimo de conciencia acerca de lo que sucede en su ámbito social, económico, etcétera, y empiezan a preguntarse qué hacer y cómo participar y desarrollar algunas de las siguientes conductas:

- Voltear la mirada al entorno
- Generar información
- Buscar opciones
- Seleccionar alternativas
- Abandonar viejas estructuras o esquemas
- Adoptar nuevos esquemas y estructuras.

En ese momento, el objetivo de la promoción es que los valores del uso y manejo del agua sean compartidos lo mismo entre funcionarios públicos que con la sociedad en general, y se conformen

equipos dirigidos por representantes de la misma sociedad y funcionarios de organismos e instituciones responsables del manejo del agua y que se encuentran dentro de la estructura formal, de los ya mencionados, para organizar programas y acciones y/o actividades propuestas por ellos mismos para resolver las situaciones identificadas, que además permitan monitorear su ejecución, así como evaluar y realizar posteriormente acciones preventivas y correctivas en cada uno de los programas propuestos.

### *Recongelamiento*

Finalmente, si se ha logrado vencer la resistencia al cambio entre servidores públicos y gran parte de la sociedad, se habrá alcanzado en buena medida el objetivo de creación de una cultura socializada.

La sensación y el estado en que se trabajaría en esta etapa mostraría participación, involucramiento y compromiso que ahora implicaría que las autoridades mantuvieran; ya que las conductas representativas de un:

- Estado homeostático
- Claridad de la situación
- Equilibrio
- Mayor adaptabilidad.

Serán evidentes, aunque las estrategias para continuar avanzando en la transformación de hábitos y costumbres deben:

- Integrar nuevos esquemas
- Establecer contacto genuino con las opciones elegidas
- Considerar el efecto del cambio en otros tipos de conductas
- Prolongar la duración del cambio.

Para que finalmente la sociedad logre la creación de una nueva cultura, deberá repetirse el ciclo de estas tres etapas cada



vez que ocurra una situación que amenace el proceso de cambio o que impida la participación con el mecanismo sistemático ya establecido de informar, participar, proponer, diagnosticar, actuar, evaluar y reiniciar.

## EL USO RACIONAL DEL AGUA Y LA CULTURA

EL CONCEPTO de cultura del agua se refiere al uso racional de este recurso. Eso es todo, pero es un problema mayúsculo para el planeta, porque implica a gobiernos y ciudadanos, a países y regiones enteros, además de comunidades de todo el orbe, de las que se demanda un cambio de actitud hacia el agua, universal y serio, que logre el reconocimiento real y efectivo de la problemática del uso del agua.

Como señala la Gerencia de Comunicación de la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2001: 77):

Hablar del agua, pareciera fácil. Estamos todos tan acostumbrados a utilizarla en distinta cantidad y calidad a diario, que nuestro nivel de conciencia sobre su cuidado es muy variable. Quien la posee en demasía, poco la valora no sólo económica sino socialmente. Por el contrario, quien poco la tiene, sabe lo que cuesta llevarla hasta donde se necesita, más allá del precio que paga por ella. Lo obvio es que se vuelve un elemento esencial para nuestra vida[...] sin agua no podemos vivir.

Y más adelante advierte:

Cuando comentamos que en 6,000 millones de personas, entonces la atención se vuelve mayor. Abundar en el tema de la calidad del agua se torna todavía más complejo, más aún si entendemos que diariamente alrededor de 5,000 personas mueren en el planeta a causa de una enfermedad de origen hídrico y que de éstas, 90% son niños.

PREMISAS BÁSICAS PARA EL  
DISEÑO DE LINEAMIENTOS DE  
POLÍTICA DEL USO DEL AGUA

A MEDIDA que los usuarios crecen y se multiplican dentro de una cuenca, mientras que la cantidad de agua disponible se mantiene invariable, el aprovechamiento del recurso se torna más complejo y conflictivo porque las demandas llegan a superar la disponibilidad del líquido, o bien, porque las aguas descargadas alteran la calidad del recurso que será utilizado posteriormente por otros usuarios, por lo que la tarea del gobierno consiste en controlar el medio físico mediante obras de infraestructura, regular las interacciones de los usuarios con el medio físico, y la interacción de los sistemas-usuarios que comparten el agua disponible de una cuenca, principalmente para establecer derechos; por lo tanto, la regulación pretende subrayar que la intervención gubernamental en relación con el agua debe garantizar condiciones de eficiencia, equidad y justicia social en el uso de un patrimonio de la nación con debido respeto y cuidado al medio ambiente, de ahí lo que las premisas básicas para el diseño de lineamientos de política y mecanismos para llevarlos a la práctica están basadas en las siguientes premisas (Conagua, 2001: 83):

- a) El desarrollo del país debe darse en un marco de sustentabilidad, para que la planeación del desarrollo logre la plena integración de los factores económicos, sociales, políticos y ambientales, y se obtenga conjuntamente el bienestar social, el crecimiento económico y la preservación del medio natural, en beneficio de las generaciones actuales y futuras.
- b) El agua es un recurso estratégico de seguridad nacional. Es uno de los recursos principales del crecimiento económico y elemento imprescindible para la renovación de muchos otros recursos indispensables en la transformación productiva y para la vida misma.
- c) La unidad básica para la administración del agua es la cuenca hidrológica. La sustentabilidad del desarrollo debe asociarse a una serie de objetivos claros, al territorio defi-

nido que contenga los elementos y recursos naturales necesarios para la subsistencia del hombre, así como a los procesos de gestión que se deben dirigir para alcanzar dichos objetivos.

Por lo tanto, la cuenca hidrológica es el territorio natural, delimitado por las zonas de escurrimiento de aguas superficiales que convergen hacia un mismo cauce, y en el que se observan condiciones particulares en aspectos físicos, biológicos, económicos, sociales y culturales.

- d) El manejo de los recursos debe ser integrado. Esto responde a la necesidad de restaurar y mantener el equilibrio de los ecosistemas, ya que la integración que guardan el agua, el bosque, el suelo y el aire hacen necesario que las estrategias de manejo deban diseñarse para el conjunto.
- e) Las decisiones deben tomarse con la participación de los usuarios. La inclusión del punto de vista de los usuarios del agua en la elaboración de planes y programas de manejo hidráulico es indispensable para el desarrollo sustentable, puesto que son ellos los principales afectados con la aplicación de políticas relativas al recurso, tanto en su uso directo como en sus actividades productivas y en la calidad de su entorno, de ahí la importancia de promover una participación responsable de los usuarios del agua y de la sociedad en general, quienes además de tener derechos, compartan obligaciones en el manejo sustentable del recurso y lo valoren en términos económicos, sociales y ambientales.

#### ESTRATEGIAS NACIONALES PARA ALCANZAR LOS OBJETIVOS FIJADOS EN EL SECTOR HIDRÁULICO

- a) Alcanzar el uso eficiente del agua en la producción agrícola con mayor apoyo a los usuarios para incrementar la eficiencia y productividad de las zonas de riego. La implantación de mecanismos para inducir el cambio tecnológico en los sistemas de riego y la incorporación al riego de nuevas

superficies, así como el apoyo a la tecnificación de las áreas de temporal, especialmente en la región sur-sureste.

- b) Propiciar la ampliación de la cobertura y calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, fomentando el desarrollo de organismos operadores, capaces de proporcionar los servicios en forma autosustentable, con la capacitación de su personal y la participación de la iniciativa privada. Apoyar a las autoridades locales y estatales para la consolidación de empresas (públicas, privadas o mixtas) encargadas de proporcionar los servicios con mayor autonomía técnica, administrativa y financiera. Realizar la inversión necesaria para abatir los rezagos existentes y satisfacer nuevas demandas. Analizar esquemas para fomentar el pago de derechos por parte de organismos operadores.
- c) Lograr el manejo integrado y sustentable del agua en cuencas y acuíferos para satisfacer las necesidades de agua, consolidar la administración integral de las aguas superficiales y subterráneas en cantidad y calidad, en todos los usos y en su manejo unitario por cuenca, así como incorporar la planeación, desarrollo y manejo de los recursos hidráulicos mejorando la regulación en el uso de las aguas nacionales diseñando los esquemas apropiados e induciendo a la sociedad en su conjunto para reconocer el valor económico del agua.
- d) Promover el desarrollo técnico, administrativo y financiero del sector hidráulico mediante el fortalecimiento de la capacidad institucional del sector agua, la descentralización de funciones operativas hacia estados, municipios o usuarios, el desarrollo de organizaciones financieramente sanas y administrativamente autónomas para la prestación de los servicios y finalmente, el desarrollo de la capacidad tecnológica que las circunstancias de los distintos sectores demanden para avanzar en el uso eficiente del agua.
- e) Consolidar la participación de los usuarios y de la sociedad organizada en el manejo del agua y la promoción de la cultu-

ra, con la participación informada de la sociedad en la planeación, aprovechamiento y administración de los recursos hidráulicos del país. Consolidar los consejos de cuenca y sus órganos auxiliares. Fortalecer el Consejo Consultivo del Agua y de los Consejos Ciudadanos Estatales y promover una cultura que fomente el uso eficiente del agua y el reconocimiento de su valor económico y estratégico.

- f) Buscar disminuir los riesgos y atender los efectos de inundaciones y sequías con desarrollo de medidas organizativas en la población para que esté preparada y responda ante la presencia de fenómenos hidrometeorológicos. Sistemas eficientes de información y alerta para conocer oportunamente la presencia de esos fenómenos. La reubicación de la población asentada en zonas de alto riesgo y la coordinación interinstitucional para regular el uso del suelo para evitar asentamientos humanos en esas zonas. Diseño de planes para el manejo de sequías y por último, la construcción de infraestructura hidráulica estratégica de control de avenidas o bien de captación y almacenamiento.

La puesta en marcha de estas estrategias (Conagua, 2001: 87) se sustenta en el conjunto de acciones, programas y proyectos que requieren una amplia participación de los usuarios, autoridades de las tres instancias de gobierno y del sector privado.

## CONCLUSIONES

LAS posibilidades técnicas para resolver muchos de los problemas que hemos mencionado ya están disponibles. Hay, por ejemplo, numerosas técnicas para determinar la calidad de las aguas, los elementos y compuestos tóxicos que pueden tener los microcontaminantes, los límites permitidos para el agua destinada a la alimentación. También hay tecnologías contrastadas de tratamiento de aguas residuales, depuración de vertidos industriales, etcétera. Hay tecnologías sostenibles que no sólo procuran disminuir la contaminación, sino que tratan de prevenir los problemas, y

hay unos principios básicos fundamentales recomendados para los proyectos tecnológicos de depuradoras, basados en el máximo reuso de aguas limpias y semilimpias, reducción de caudales, separación inmediata de residuos, donde se producen, sin incorporarlos a las corrientes de desagüe, para tratarlos separadamente, etcétera.

En lo que se refiere a impedir el agotamiento de los recursos de todo tipo (aguas subterráneas, bancos de pesca), las técnicas y los planes de actuación ya están previstos y cuentan con formas de control extremadamente fiables, que van desde la vigilancia vía satélite al análisis genético de las capturas.

Algo que exige impulsar la educación para la sostenibilidad y, como parte de la misma, una “nueva cultura del agua”:

Para asumir este reto se precisan cambios radicales en nuestra escala de valores, en nuestra concepción de la naturaleza, en nuestros principios éticos y en nuestros estilos de vida; es decir, existe la necesidad de un cambio cultural que se reconoce como la nueva cultura del agua.

Una nueva cultura que debe asumir una visión holística y reconocer las múltiples dimensiones de valores éticos, medioambientales, sociales, económicos, políticos y emocionales integrados en los ecosistemas acuáticos. Tomando como base el principio universal del respeto a la vida, los ríos, los lagos, las fuentes, los humedales y los acuíferos deben ser considerados como Patrimonio de la Biosfera y deben ser gestionados por las comunidades y las instituciones públicas para garantizar una gestión equitativa y sostenible.

Todo esto nos hace patente la necesidad de formar una conciencia a escala global, que abarque prácticamente a toda la población del mundo, pero que solamente puede lograr efectividad con liderazgos orientados expresamente a este propósito, formados en una cultura del agua suficiente que se refleje en el cambio que se busca en la actitud de la gente hacia el recurso.

El promotor de la nueva cultura del agua, tiene que ser, efectivamente, un agente de cambio, suficientemente informado de la problemática, como para responder al reto de lograr que grandes grupos humanos cambien su forma de percibir el recurso y sean conscientes de la necesidad de su preservación.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABRAVANEL, H., Y. Allaire, M. Firsirotu, B. Hobbs, R., Poupart y J.J. Simard (1992), *Cultura organizacional. Aspectos teóricos, prácticos y metodológicos*, Colombia, Legis.
- AUDIRAC, C.C.A. (1994), *El ABC del desarrollo organizacional*, México, Trillas.
- CONAGUA (2001), *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*, México, Comisión Nacional del Agua.
- LIPPITT, R., J. Watson y B. Westley (2001), *La dinámica del cambio planificado*, Buenos Aires, Amorrortu.
- PARTING, J. (1993), *Perspectivas del desarrollo organizacional*, EUA, Fondo Educativo Interamericano.
- VAN RIEL, C. (1998), *Comunicación corporativa*, Madrid, Prentice Hall.





*Sustentabilidad y nueva cultura del agua:  
una aproximación metodológica para evaluar  
el caso del Valle de México*

INTRODUCCIÓN

**H**AY UN AMPLIO CONSENSO en la comunidad académica, en la sociedad civil y en los funcionarios gubernamentales (incluido al aparato legislativo) sobre la misión que se deberá cumplir a la luz de una “cultura del agua” bajo las premisas de un manejo sustentable: satisfacer las necesidades de las presentes generaciones sin detrimento de las futuras. Sin embargo, el modelo analítico para la comprensión de la actual problemática, así como el diseño instrumental para favorecer el cumplimiento de tal aspiración se ha constituido en un amplio debate nacional. Eso resultó evidente en los centenares de ponencias presentadas en el foro paralelo y alternativo al institucionalizado IV Foro Mundial del Agua, celebrado en la Ciudad de México en marzo de 2006, así como durante las sesiones del Tribunal Latinoamericano del Agua, sostenidas en el mismo periodo y en los diversos movimientos sociales suscitados en los últimos años (por ejemplo, el de la presa “La Parota” o las reivindicaciones del pueblo mazahua para el cumplimiento de los acuerdos signados durante decenios a cambio del agua que proviene de sus tierras en la cuenca del río Lerma).

\* David Barkin, profesor-investigador de economía en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco; Edith García, Mara Rosas y Daniel Tagle, candidatos a doctores en el Posgrado en Ciencias Económicas de la UAM; Mario Fuente, biólogo y profesor-investigador de la UAM-Oaxaca y estudiante de doctorado en la Universidad Autónoma de Tlaxcala; y Fernando Lara, candidato a maestro en Ciencias Económicas de la UAM [barkin@correo.xoc.uam.mx].

Se agradecen las valiosas aportaciones de la doctora Blanca Lemus, Érika Carcaño, Roberto Escorcía, Isabel Rodríguez, Paola Lemus y Yanet Sánchez para la elaboración de este documento.

El modelo hegemónico de una “cultura del agua” es operado por el Estado mexicano. La política ambiental (como la rural, la de salud, la laboral) está subordinada a los intereses de la política económica sentada en las bases de una racionalidad económica de corte neoliberal y de los compromisos y procesos generados de la integración económica internacional. Con ello, el problema ambiental, agudizado por dicho proceso económico, se pretende resolver “objetivamente” por medio del diseño y aplicación de diversos instrumentos técnicos; entre éstos, los que destacan son las campañas de “educación ambiental” de los ciudadanos, la ecoeficiencia y los instrumentos del mercado. En esta tarea, la Economía Ambiental (EA) –derivada de la teoría económica neoclásica– se ha impuesto como el paradigma predilecto gubernamental para la puesta en práctica de la nueva cultura del agua, ello mediante el diseño de instrumentos de valoración del agua a partir de un lenguaje único: el monetario. Desde este modelo de “internalización” de los costos, se coloca a los usuarios domésticos como los principales “causantes” de la escasez y contaminación y, por lo tanto, son objeto de los controles generados por los instrumentos económicos que propone.

En contraste, en este artículo se propone la formulación de un modelo alterno emergido desde la Economía Ecológica (EE) y la Nueva Cultura del Agua (NCA). En la primera sección se describen sus principales características fundamentadas en los siguientes criterios metodológicos: la incorporación de otros lenguajes de valoración del líquido en función de los usuarios; la integración del tema de los conflictos ecológicos distributivos generados en los procesos de apropiación social del agua; y la inscripción de los principios de equidad, justicia social y responsabilidad ambiental que ponen en el centro del escenario lo imperativo de atender a los grupos sociales más necesitados y al ecosistema mismo.

En una segunda sección, tomando como referente empírico la problemática manifestada en el Valle de México, se procede a realizar un diagnóstico sobre la gestión pública del agua. Se toman

como referencia diversos estudios, como los de Legorreta (2006a, 2006b), que plantean una nueva visión del potencial hídrico de la Ciudad de México. Desde este punto de vista, se hacen evidentes los conflictos ecológicos distributivos generados en el manejo del agua bajo las actuales políticas, no sólo entre los ciudadanos del Valle, sino entre éstos y las cuencas aledañas. Asimismo, se señala la falta de voluntad política para generar una visión integral del recurso y se aborda la problemática del uso ilegítimo del agua, principalmente por los grandes usuarios, y se analiza el impacto causado en el acceso social y privado del recurso.

En la tercera sección, se presentan las premisas conceptuales de nuestra propuesta para la gestión del agua. Se incluye una propuesta tarifaria para recalcar una visión de equidad y justicia social, que también pretende conciliar los intereses de los diferentes usuarios en función de la disponibilidad de la cuenca.

MODELO DE GESTIÓN DEL AGUA:  
PRINCIPIOS METODOLÓGICOS  
DESDE LA ECONOMÍA ECOLÓGICA  
Y LA NUEVA CULTURA DEL AGUA

COMO parte de las premisas convencionales de la teoría económica neoclásica, el modelo de cultura del agua y su manejo sustentable parte de un concepto descontextualizado: la escasez, específicamente la escasez del agua. En esta tesitura paradigmática, se identifica al mercado como el instrumento de asignación más eficiente, y además con una capacidad autorregulable. Este modelo es particularmente notable para explicar las causas y alternativas de la escasez del líquido en el caso de la Ciudad de México. Por tanto, el desarrollo de programas de educación ciudadana para el cuidado y pago del agua, así como el desarrollo tecnológico de grandes sistemas de tratamiento de agua y el diseño de una política ambiental basadas en instrumentos económicos se convierten en los pilares de la propuesta “metodológica” de la economía ambiental.

En este trabajo se parte de la premisa de que dicho modelo de gestión del agua basado en los supuestos de la EA e instrumentado por la Comisión Nacional del Agua (Conagua) agudiza la desigualdad e injusticia social, degrada el ambiente y pone en peligro las fuentes de que dispone el país (Barkin, 2006). La gestión de agua comandada por la Conagua ha privilegiado a los grandes usuarios en detrimento de la esfera social y ambiental. En el 2003, se reportó que 89.4% de la población urbana estaba conectada al servicio de agua potable regular y 77.2% conectada a las redes de alcantarillado; estas cifras son engañosas, ya que no se le ofrece un servicio adecuado a la población que se encuentra en asentamientos irregulares, segmento que representa hasta 35% del total (Barkin, 2006). Aunado a esto, se encuentra una acción deficiente en calidad y en cantidad de los organismos operadores del servicio debido a problemas técnicos, financieros y políticos.

Frente a este modelo analítico y operativo, planteamos la necesidad de construir una propuesta con base en otras premisas y principios metodológicos, los cuales desglosamos en el siguiente apartado.

### *La calidad de la información*

En este eje hay un reconocimiento de las limitantes del enfoque de la EA, en particular, y de las ciencias (“normales”, positivistas) y de la tecnología en general para el manejo de la (calidad de la) incertidumbre y por tanto, en la toma de decisiones en problemas vinculados con los riesgos ambientales generados por la gestión del agua. De esta limitación de la EA se derivan diversos conceptos y criterios metodológicos, entre los que se destacan los siguientes:

- *La ciencia posnormal.* En la que se reconoce la necesidad de incorporar a la “comunidad de pares extendidos” (es decir, comunidades no institucionalizadas en la academia) en la “evaluación de los *inputs* científicos para la toma de decisiones” (Funtowicz y Ravetz, 2000). Este señalamiento es fundamental para la reflexión que se realiza desde el contexto latinoamericano, dada la alta riqueza de *saberes* desplegados

por comunidades que han desarrollado una serie de estrategias contestatarias a las lógicas de degradación ambiental (Duraiappah *et al.*, 2005).

- *El Principio precautorio*. En él se plantea como insuficiente definir la viabilidad de los proyectos en función de su criterio económico y coyuntural, vinculado con la definición de políticas ambientales centradas en instrumentos de comando y control. Plantea integrar en la cultura de la política ambiental un mecanismo de defensa de la sociedad civil ante los riesgos de proyectos que tengan la posibilidad (incluso por desconocimiento) de generar daños a la salud humana y al ambiente. Este principio introduce un criterio de valoración en el desarrollo de proyectos en los que no se tenga la certeza de su nocividad: no se deben permitir, o en su caso, acceder sólo en aquellos, que identificando algunos riesgos y que son indispensables para satisfacer una necesidad esencial, son sometidos a un proceso democrático (Riechmann y Tickner, 2002).
- *El análisis multicriterial*. Como propuesta metodológica que enfrenta al enfoque de análisis costo-beneficio basado en un solo criterio: el económico, expresado mediante una definición de precios. Desde éste se plantea que las técnicas de valoración monetaria de bienes y servicios no sólo son insuficientes sino inconmensurables frente a otras valoraciones como las de la salud o la vida misma (Munda, 2004).

### *Aspectos biofísicos y la unidad medioambiental*

En este eje de criterios se evidencia la alta complejidad del sistema económico-ecológico. Mientras que en la EA se visualiza al agua como insumo, desde la perspectiva de la EE se percibe como un sistema complejo biofísico, pero también da la pauta para incorporarlo como objeto de proceso de reapropiación social.

Vinculados con el *principio precautorio*, los conceptos integrados en este eje complementan y evidencian los límites *termodinámicos* y *homeostáticos* que tienen los ecosistemas para soportar los ritmos del modelo de crecimiento económico impuesto desde la

racionalidad económica. De estas consideraciones también se desprenden criterios metodológicos para enjuiciar varios de los preceptos de la EA, entre ellos, por ejemplo, la idea de *la tasa de descuento o contaminación “óptima”*, así como la diferencia entre las escalas de tiempo de los ritmos de extracción del agua con fines económicos con respecto a los ciclos biogeoquímicos medidos en escalas de tiempo geológico.

- *Segundo principio termodinámico (entropía)*. Entendido en su forma más simple como los procesos de degradación (menos “útil”, menos ordenada) que sufre la energía en cada transformación, es incorporado por Georgescu-Roegen (1976, 1994) al pensamiento económico; con ello viene a revolucionar una serie de concepciones sobre la idea del crecimiento económico ilimitado y sobre la degradación de la calidad del agua en cada proceso o transformación.
- *El metabolismo social* es otro concepto relevante para el tema de la sustentabilidad y del manejo del agua desde la óptica latinoamericana (Toledo, 2008; Martínez, 2007). Desde esta noción se incorpora una serie de criterios para evaluar al sistema económico a partir de *flujos de energía y ciclos de materia*, con lo que se permite ubicar a la esfera económica como un sistema abierto. Vinculado con dicha noción se encuentra el concepto de *agua virtual*.
- *La insustituibilidad del capital natural por el capital socialmente fabricado*. Esta premisa metodológica se alimenta de todos los señalamientos enunciados en este eje, y es fundamental en los procesos de la diferenciación del modelo de gestión del agua derivado de la EE con respecto a la propuesta ortodoxa. De ella se deriva la diferenciación conceptual y metodológica entre una *sustentabilidad fuerte* impulsada por la EE y una *sustentabilidad débil* expresada por la EA a través del uso exclusivo de instrumentos económicos. En otras palabras, desde la premisa de la insustituibilidad del capital natural (léase agua) por capital socialmente fabricado, se construye el concepto de *sustentabilidad fuerte*, y con ello se relativiza el papel de los instrumentos económicos frente a la impor-

tancia del principio precautorio y de los instrumentos de comando y control usados en las políticas ambientales.<sup>1</sup> Así, por ejemplo, la fórmula predilecta de la EA de una *sus- tentabilidad débil* se ve reflejada en la idea tan comúnmente usada en el manejo del agua: “el que contamina paga”, lo cual es rechazado en muchos casos por la EE, pues hay acciones irreversibles contra las propiedades termodinámicas y homeostáticas de los ecosistemas, y de manera especial de la salud humana que no pueden ser “recompensados” (restaurados, rehabilitados) con un equivalente monetario. En estos casos, los instrumentos económicos no sólo son insuficientes, sino que generan mayor inequidad, injusticia social y deterioro ambiental. Una implicación de este señalamiento, dentro de la política ambiental, se refiere a no sustituir el papel que desempeñan los instrumentos denominados de comando y control (figura 1).

- *La unidad de manejo ambiental.* Se parte del supuesto de que la mínima unidad de manejo ambiental está vinculada directamente con el concepto de cuenca hidrológica, sobre todo si el eje de las acciones lo constituye la gestión del agua. Por ello, se pretende hacer un diagnóstico del Valle de México como cuenca integrada, y con ello buscar que cada una de las acciones locales con el manejo del agua presente la mayor congruencia técnica, logística, política y económica. En este sentido, las disposiciones y negociaciones dadas al interior de los respectivos Consejos de Cuenca integrados por la Conagua pueden constituir un punto favorable de trabajar. No obstante, se reconoce la necesidad de integrar accio-

<sup>1</sup> Para el caso de México, están considerados de manera explícita en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) lo referente al uso de los instrumentos económicos como un incentivo de la política ambiental para “promover un cambio en la conducta de las personas que realizan actividades industriales, comerciales y de servicios, de tal manera que sus intereses sean compatibles con los intereses colectivos de protección ambiental y de desarrollo sustentable” [...] O para que quienes “hagan un uso indebido de recursos naturales o alteren el ecosistema, asuman los costos respectivos”. A manera de ejemplo del esfuerzo académico por la construcción de dichos instrumentos económicos se puede consultar a Ávila y colaboradores, 2003.

nes paralelas a estos consejos para elevar el nivel (cualitativo) de la participación de los usuarios del agua dentro de los procesos de concertación desarrollados por los respectivos Consejos de Cuenca.

*Las limitantes en la disponibilidad,  
uso y beneficios de los procesos de apropiación social  
del agua: los conflictos ecológicos distributivos*

El *conflicto ecológico distributivo* intenta responder de manera alternativa una serie de preguntas en el modelo de gestión del agua derivado de la EA, en donde ha manifestado su ceguera analítica: ¿cómo es posible construir un modelo de gestión de agua desde los supuestos de la sustentabilidad entre usuarios/clases sociales dadas las amplias diferencias históricas y estructurales de sus necesidades, obstáculos y mecanismos para satisfacerlas?, ¿qué relación hay entre estas diferencias y el uso del mercado como el mecanismo predilecto de la racionalidad económica para la distribución de los costos y beneficios desprendidos de la relación sociedad-naturaleza?

En el centro de la crítica de la EE a la ortodoxia está el asunto de la procedencia, justificación y alternativas ante las actuales formas en que se distribuye el ingreso, el poder, la propiedad y en general los procesos de apropiación de los recursos naturales y sus productos como el agua, así como los costos sociales y ambientales involucrados por esta concentración. Desde este concepto, se evidencia la relación entre el poder económico y el político en los diferentes niveles de la organización social involucrados en los procesos de apropiación social del agua (Martínez, 2005).

*Usuarios del agua y lenguajes de valoración*

La NCA propone una relación social-económica-política-ambiental orientada por una nueva escala de lenguajes de valoración del agua en el que la premisa de la democratización de la distribución del agua, la participación social en su administración y la respon-



sabilidad ambiental son ejes fundamentales. Desde este punto de vista, se prioriza la resolución de los conflictos ecológicos distributivos como parte central del quehacer público y la obligación de partir de criterios de equidad, justicia social y responsabilidad ambiental. Este planteamiento, congruente con la Declaración Europea para una NCA (2005) y la Directiva Marco para el manejo del agua en Europa, establece prioridades para los siguientes usos fundamentales del agua: 1) Agua como derecho humano; 2) Agua para los ecosistemas; 3) Agua para usos sociales y comunitarios; 4) Agua para el desarrollo económico y bienestar social. También plantea la necesidad de castigar y controlar su uso en funciones ilegítimas (figura 1).

### FIGURA 1

#### USUARIOS DEL AGUA Y LENGUAJES DE VALORACIÓN

- 
1. Derecho humano ← ético: equidad, justicia (gratuito)
  2. Para el ecosistema ← ético: ambiental (gratuito)
  3. Para usos sociales ← ético: equidad, justicia (gratuito)
  4. Economía/bienestar S. ← instrumentos económicos-subsidio cruzado

Funciones ilegítimas ← Instrumentos de comando y control-utilidad pública  
Principio precautorio

---

Fuente: Elaboración propia.

Los primeros tres usos comprenden cuestiones sociales y ambientales, plenamente relacionadas con principios éticos de equidad, justicia y sustentabilidad. El *agua como derecho humano* se refiere al establecimiento de un piso de dignidad básico de consumo, que garantice el bienestar individual y colectivo y que debe otorgarse de forma gratuita; los requerimientos para sostener la agricultura de subsistencia podrían caer aquí también. Actualmente, las autoridades mexicanas, basándose en el paradigma de la EA, consideran que el no pago es una de las principales causas de los problemas en la gestión del agua; sin embargo, consideramos que la solución de los problemas actuales no está en penalizar el consumo de esta cantidad básica. Más bien, implica un nuevo

principio de cobro fincado en una visión interdisciplinaria que instrumente el compromiso social inscrito en la Carta Magna de la Nación.<sup>2</sup>

El *uso para el ambiente* busca garantizar el buen estado de los ecosistemas hídricos privilegiando tanto su conservación como su rehabilitación. Aquí se eleva el ecosistema al estatus de un consumidor prioritario. Así, se debe asegurar que el consumo de agua del resto de los usuarios no supere la capacidad de recarga de los mantos acuíferos. El tercer uso, el de *la solidaridad social*, obliga al Estado a imponer una nueva política que garantice el servicio de agua para todos los servicios públicos y urbanos, incluidos los parques, hospitales, escuelas, etcétera, es decir, se consideran las instalaciones públicas necesarias para consolidar aquellas actividades de interés general, sin fines de lucro, conducentes a fortalecer a la sociedad.

El *agua para el desarrollo económico* implica el mayor consumo de todos. Es aquí donde se clasificarían los consumidores residenciales que requieren más que lo contemplado por el “piso de dignidad” mencionado en el primer destino; administrado por el organismo local; este consumo sería cobrado según una tarifa progresiva. También contempla los usuarios agrícolas, comerciales e industriales, que consumen la mayor parte del agua disponible en el país, en el proceso de organizar sus actividades productivas con fines de lucro. A partir de esto, es en el agua-negocio donde deben recaer los cobros para sufragar el costo del servicio de agua potable, alcantarillado y saneamiento, mediante un sistema de tarifas con subsidios cruzados para operar la visión de equidad, justicia y sustentabilidad.

<sup>2</sup> La sociedad civil ha mostrado un interés en la participación activa con esta orientación. Muestra de ello lo representa la iniciativa de formación del grupo Promotor de la Campaña “El agua a la Constitución” de la Coalición de Organizaciones Mexicanas por el Derecho al Agua (COMDA). En esta coyuntura, el 7 de diciembre del 2006 en la Cámara de Diputados se presentó la propuesta de iniciativa tendiente a incorporar el acceso al agua como garantía constitucional. Se propone reformar los artículos 4 y 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, con la consiguiente formulación de la Ley que “establezca los instrumentos y apoyos necesarios a fin de garantizar un acceso al recurso que permita una vida digna y decorosa” (véase Cámara de Diputados 2006. <http://gaceta.diputados.gob.mx/Gaceta/60/2006/dic/20061207-1.html#Ini20061207Lavara>).

Finalmente, resulta fundamental sancionar y reducir el uso antisocial o francamente ilegal de los mantos acuíferos y las descargas de aguas contaminadas. Además de extracciones excesivas de las concesiones, abunda la explotación de pozos no regulados o no autorizados y perforaciones horizontales, así como problemas sistemáticos de robo de agua de la red de distribución urbana, entre otros. Asimismo, a pesar de una normatividad para las descargas contaminadas y una obligación de eliminarlas, el problema se sigue acrecentando. Ante esto, la propuesta de la NCA consiste en evitar o revertir, a todo costo, este tipo de uso, mediante una adecuada vigilancia por parte de la autoridad y de la participación activa de la misma sociedad, así como una fuerte penalización (social, jurídica y monetaria). No basta con la internalización de los costos de los problemas generados en la sociedad o la naturaleza; más bien, debe establecerse una nueva relación con el medio ambiente y hacia él que permita la sustentabilidad del recurso, sobre todo para el usufructo de las generaciones futuras.

#### EL AGUA EN EL VALLE DE MÉXICO COMO REFERENTE EMPÍRICO

##### *El “problema” de la escasez*

La Ciudad de México es uno de los consumidores de agua más grandes del mundo (Legorreta, 2006a). Su consumo es del orden de 72 metros cúbicos por segundo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) para abastecer a una población de más de 22 millones de personas. Ahora bien, ¿cuáles son los recursos hídricos con que dispone el Valle de México? La Ciudad de México depende mayormente de agua subterránea y de la importación de agua de otras regiones: unos 3,000 pozos surten  $50.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ; otros  $20.3 \text{ m}^3/\text{s}$  provienen de la Cuenca del Lerma y de las presas de Cutzamala, y sólo,  $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$  de ríos y presas que se encuentran en el Valle de México.

Legorreta (2006a) nos obliga a cuestionar si realmente la Ciudad de México requiere de la importación de agua de otras regiones. Plantea un escenario de una relativa abundancia y una infra-

estructura inadecuada, ya que hay en la ciudad 48 ríos con abundante agua cristalina que es enviada directamente al drenaje. Catorce conducen agua durante todo el año,<sup>3</sup> y los demás (34), durante el periodo de mayo a octubre. Asimismo, nos recuerda que el Valle de México es una cuenca lacustre cerrada que recibe abundante agua de lluvia (precipitación pluvial entre 700 y 1,500 mm por año); la mayor parte es canalizada directamente al drenaje, lo que genera un gran problema de *vulnerabilidad hidráulica*, por el peligro que provocan las inundaciones. Salvo opinión autorizada al contrario, no debemos seguir operando con el velo de la escasez física del agua ni con la falta de voluntad política para gestionar toda el agua para el manejo sustentable de la cuenca. Dictamina:

...la escasez, que invariablemente se presenta en determinadas zonas de la ciudad y en determinados sectores sociales, no depende del volumen del líquido sino de los criterios y las infraestructuras de su distribución. Más obras y mayor volumen de abastecimiento de agua no han garantizado ni garantizarán el suficiente líquido hacia las zonas y sectores de la población que lo necesitan (Legorreta, 2006a: 109).

*El problema de la distribución del agua:  
usuario domiciliario*

El alto consumo de agua que se da en la Ciudad de México tiene varias explicaciones. Una de ellas deviene del elevado nivel de fugas en la red de distribución (25 m<sup>3</sup>/s, es decir, 35% del total), por tomas clandestinas, y por el bajo nivel de agua tratada para su reuso (8 m<sup>3</sup>/s, es decir, 10% del total).

Otro factor fundamental, vinculado con los conflictos ecológicos distributivos se puede encontrar en un indicador revelador: el consumo promedio actual de agua por habitante es de 282 litros

<sup>3</sup> Magdalena, Santo Desierto-Mixcoac, Tacubaya, Tlalnepantla, Hondo, San Javier, Chico de los Remedios, San Ildefonso, San Pedro, la Colmena, Cuautitlán, Tepozotlán, Ameca y San Rafael (véase Legorreta, 2006a).

por día (l/día), pero en este dato no se reflejan las grandes desigualdades en disponibilidad y calidad entre los diferentes grupos sociales y clases de usuarios (domésticos, comerciales, industriales y agrícolas).

En el caso del consumo doméstico, las disparidades entre usuarios en distintas zonas son notorias. El consumo mínimo promedio de agua se registra en Ecatepec, con 28 l/día; el consumo medio de agua se registra en Santa María Insurgentes, con 176 l/día, mientras que en las Lomas de Chapultepec, se registra el mayor consumo promedio, con 885 l/día, que refleja la terrible injusticia en la gestión del agua para el consumo humano (Legorreta, 2006a). Esto es agudizado por las diferencias de calidad entre zonas que imprimen aún más un carácter discriminatorio en materia de agua en la Ciudad de México (cuadro 1).

CUADRO 1  
DISTRIBUCIÓN DE AGUA  
ENTRE LOS USUARIOS DOMÉSTICOS

<i>Zona</i>	<i>Consumo m<sup>3</sup>/bimestre x familia (4 personas)</i>
Ecatepec	6.720
Sta. Ma. Insurgentes	42.240
Lomas de Chapultepec	212.400

Fuente: Elaboración propia con base en los datos proporcionados por Legorreta (2006a).

*El problema de la distribución del agua:  
usuario industrial*

La Conagua se ha esforzado por aplicar su visión burocrática de la cultura del agua, responsabilizando al usuario doméstico por los graves problemas que enfrenta el sector (por ejemplo, “Ciérrele” o “¡Qué Poca...!”). Ante tal situación, la Conagua subraya la necesidad de aplicar el principio de racionalidad económica, sin considerar que el uso doméstico representa sólo una pequeña parte del problema de la gestión integral de los recursos hídricos a escala regional.

Es en los usos con fines “productivos” donde se localizan los más altos niveles de consumo, contaminación y sobreexplotación de los cuerpos de agua. No obstante, estos usuarios quedan fuera de la gestión integral del agua. Es a ellos a quienes se les debe aplicar el principio de racionalidad económica mediante tarifas adecuadas y el principio precautorio (que se discute más adelante). La sociedad debe dirigir su atención a estos usuarios que aprovechan el agua por su aportación económica si realmente se quiere crear un uso racional que permita la sustentabilidad.

Considerando su importancia en la producción, muchas empresas abusan de su acceso al agua; esto es notorio en el caso de las cerveceras, refresqueras y empresas de agua embotellada; nuestro país se coloca como el segundo consumidor de agua embotellada del mundo, así como del consumo per cápita de refrescos. Son los usuarios con fines productivos los que acumulan grandes beneficios por su aprovechamiento del agua, sin que correspondan con una aportación proporcional al financiamiento de la operación, conservación y rehabilitación de los sistemas de captación, distribución, tratamiento y abastecimiento (figura 2).

FIGURA 2

### ASPECTOS INVOLUCRADOS EN EL CONSUMO DE AGUA PARA USO DE LA INDUSTRIA

• Altos requerimientos de “agua virtual” (cerveza, leche, refrescos, agua embotellada...)	→	Altas ganancias
• Posee la mayor parte de los pozos: no entra a la red	→	Costos no incluidos; falta de control; altos grados de resiliencia del ecosistema; uso ilegal (justificado con uso agrícola, pero empleado para la industria).
• Uso del drenaje común con el doméstico	→	No incorpora los altos costos de su tratamiento especial, implica el uso de grandes sistemas de tratamiento de agua.
• ¿Pagar por contaminar? Se evade el pago, y en el caso de tratarse de residuos peligrosos, se deberá evitar (clausurar, expropiar).	→	No opera el principio precautorio.

Fuente: Elaboración propia.

## PROPUESTA DEL MODELO DE AGUA PARA LA CIUDAD DE MÉXICO

### *Señalamientos generales*

Casi todos los profesionales en el sector concuerdan en que el manejo del agua debe incluir el cuidado, tratamiento, cobro y pago por parte del usuario doméstico para garantizar el acceso universal al agua como derecho humano. El problema es, entonces, analizar en qué medida los mercados y los derechos de propiedad del agua pueden resolver el dilema del uso irracional del agua para superar la actual ineficiencia, tanto en la gestión de la oferta como de la demanda. El reto es determinar si la solución se encuentra en fijar una cuota de agua que incluya los costos convencionales (extracción, transportación, suministro y depuración de las aguas servidas) y los costos ambientales (por importación de agua y por exportación de aguas negras), así como los impactos energéticos y de salud. Además, requiere asegurar que se cumpla con los compromisos sociales y ambientales por parte del Estado y de la sociedad en su conjunto.

En la Ciudad de México, como en casi todo el país, los operadores excluyen a los grandes usuarios de sus esfuerzos para gestionar el agua en el valle. A pesar de que los patrones de uso actuales constituyen una amenaza para el equilibrio hidráulico de la cuenca y la calidad de sus aguas, no hay una regulación efectiva. Por eso, diversas propuestas, por ejemplo, la presentada por Saldívar (2006) de internalizar los costos ambientales entre los usuarios domésticos, no contribuyen a una solución conducente a la gestión integral de la cuenca, ya que deja de lado los problemas más contenciosos.<sup>4</sup>

Este principio debe aplicarse tanto a los responsables para la gestión integral de la Cuenca del Valle de México como a los usuarios. En primera instancia, requiere adoptar las medidas necesarias para detener la importación innecesaria de agua desde fuera de

<sup>4</sup> Usamos esta propuesta como base de comparación para ilustrar con claridad las diferencias entre los puntos de vista más ortodoxos, con base en la economía ambiental, y la nuestra, emanada de la economía ecológica y el marco de la nueva cultura del agua.

la cuenca con los daños ambientales y sociales que acarrea. Para prescindir de esta agua, se requiere de inversiones para aprovechar el agua disponible localmente y poner en marcha las medidas conducentes a evitar las inundaciones y el hundimiento que el sistema actual ocasiona. Luego, para los usuarios residenciales, implica un proceso de educación y de cambio de hábitos para generar un uso más racional del líquido, reforzado con una estructura tarifaria que castiga el dispendio.

Para las autoridades, requeriría una acción concertada, con la participación activa de la población, para terminar con las cuantiosas fugas en la red de agua potable y alcantarillado mediante la instauración de sistemas eficaces de sectorización y un programa intensivo de reemplazo de las partes dañadas.

Además, se requiere el diseño de instrumentos que garanticen la aplicación y cumplimiento del principio precautorio por parte del Estado que abarquen los criterios de transparencia, acceso a la información y participación social. Para las comunidades rurales en el valle, y los agricultores en particular, sobre todo en las partes altas, se tendrían que intensificar los esfuerzos para concertar un programa de conservación y rehabilitación de los ecosistemas, que implicaría programas de reforestación y ordenamiento del uso del suelo, así como un uso más informado y limitado de agroquímicos para reducir la contaminación. Estas responsabilidades emprendidas por algunos de los grupos sociales más marginados de la región deben ser correspondidas con pagos del propio Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) para apoyar proyectos productivos que fomentarían una organización más sustentable de esas comunidades. Los grandes usuarios comerciales e industriales también serían obligados a actuar precautoriamente al adoptar medidas enérgicas para reducir los volúmenes extraídos y eliminar las descargas contaminantes, especialmente las tóxicas que afecten a la sociedad y sus ecosistemas. Eso se haría pasando la carga de la prueba a quienes emprenden actividades peligrosas, estableciendo criterios y una estructura para la toma de decisiones respecto al daño en caso de incertidumbre.

Poner en práctica el *principio de precaución* junto con el sistema de prioridades propuesto por la NCA en las políticas públicas gene-



raría nuevos criterios y mecanismos para la toma de decisiones a escala local, estatal y nacional en aquellas actividades que pongan en riesgo la resiliencia de los ecosistemas y la salud de los seres humanos. El proceso terminaría con la visión actual de internalizar las externalidades mediante el mecanismo monetario, un instrumento inadecuado para este propósito. En su lugar, se promovería una participación ciudadana en la administración del sistema y el fin de la práctica tan depredadora, socialmente injusta e innecesaria de desviar aguas de otras cuencas, empobreciendo a sus pueblos, sin la mínima consideración o respeto por sus derechos ciudadanos y sus necesidades.<sup>5</sup>

### *La propuesta tarifaria.*

#### *Un esquema de subsidio cruzado para la sustentabilidad*

Hay muchas propuestas para reformar el sistema tarifario en la Ciudad de México mediante cobros más equitativos y sensibles a la necesidad de fomentar la conservación. Sin embargo, la mayor parte se limita a cobrar el servicio de agua únicamente a los que reciben servicios de la red de distribución del SACM, lo que implica dejar de lado a los principales consumidores y contaminadores del agua, los que se abastecen de pozos concesionados. También contemplan que los usuarios domésticos de aquellas zonas más marginadas tienen que pagar por su derecho humano, aun cuando el agua que reciben ni siquiera cumple con los estándares mínimos de calidad.

Para el caso específico del cobro de tarifas hacia el consumo del agua por usuarios domésticos, Saldívar (2006) propone establecer dos bloques tarifarios (cuadro 2, columna 1). El primero cubre los consumos de 0 a 25 m<sup>3</sup> (con 1 m<sup>3</sup> donado por la administración), con un costo de 10 pesos por m<sup>3</sup>, es decir, 240 pesos por este bloque. El segundo bloque, de 26 m<sup>3</sup> o más, con un costo

<sup>5</sup> Para una discusión de casos donde las administraciones públicas están poniendo en práctica sistemas que toman en cuenta la NCA y el principio precautorio con participación ciudadana, véase la colección de estudios de caso compilada por Balanyá *et al.* (2006), disponible en el sitio: <http://www.tni.org>

de 22 pesos por  $\text{m}^3$ . Según el autor, el primer bloque subsidia al usuario, ya que únicamente cubre los costos económicos y de amortización de abastecimiento del agua; el segundo, con una tarifa de castigo, incluye los costos anteriores más la internalización de los costos ecológicos; afirma que 55% de la demanda total se encuentra en el rango de 20 a 70  $\text{m}^3$  de consumo. Sin embargo, nos preguntamos si la intención es castigarlos, ¿por qué no cobrarles la tarifa más alta una vez que han rebasado los 25  $\text{m}^3$  del primer bloque?, es decir, también cobrar los primeros 25  $\text{m}^3$  a la tarifa de 22 pesos.

Al cobrar aun para los consumos más reducidos, esta propuesta no considera el derecho humano al agua. Tampoco contempla el agua para aquellas actividades de interés general y excluye aquellos grandes consumidores que extraen agua del acuífero del Valle de México con sus propios medios. La propuesta se separa de los principios de justicia social, equidad y sustentabilidad de la NCA, al considerar en su solución el cobro del derecho humano, indicado por el autor, a los más pobres y sin resolver con ello la imperante necesidad de reestablecer un equilibrio hídrico en el Valle de México. Ante esta postura, ofrecemos una propuesta alternativa para gestionar el agua, acorde con los lineamientos de la NCA:

*Primero.* Para cumplir con el derecho humano al agua se propone otorgar, por ejemplo, los primeros 10  $\text{m}^3$  de manera gratuita por toma domiciliaria y de forma mensual o bimestral, en todos los hogares de la ciudad, sin que exista algún tipo de discriminación entre zonas (esta cantidad debe variar de acuerdo con el número de personas servidas por la toma). La importancia de este punto es que todo individuo goce de esta garantía mediante el acceso a agua de buena calidad.

Cumplir con este derecho humano implica cuestiones de ingeniería, finanzas y política. Se requiere ampliar la red de distribución de agua potable y de alcantarillado hacia todas aquellas áreas que no cuentan con dicho servicio; también es necesario instalar una toma de agua para cada hogar con su correspondiente medidor. Las implicaciones de tipo financiero nos llevan a plantear cuestiones fundamentales que respondemos a continuación de

manera muy somera con nuestra propuesta: ¿quién debe absorber el costo total de la red de agua potable y alcantarillado, así como los medidores? En el plano político, ¿debe otorgarse el servicio de agua potable y alcantarillado en aquellas zonas de asentamientos irregulares?, ¿debe otorgarse o no este derecho humano de forma gratuita a las zonas de mayores ingresos?

*Segundo.* Para garantizar el buen estado de los ecosistemas y de los cuerpos de agua se propone: 1) crear un fondo para proyectos comunitarios productivos sustentables en las zonas de recarga de los acuíferos; 2) aprovechar las variadas tecnologías para construir plantas tratadoras de aguas negras en diversas partes de la ciudad;<sup>6</sup> 3) crear un esquema tarifario con varios bloques de consumo, para los usuarios comerciales e industriales, que cobre, además, las descargas tanto en cantidad como en calidad. De esta manera, se fomentaría la puesta en marcha de procesos de tratamiento y de reuso; se sugiere establecer mecanismos que recompensen a aquellos usuarios que previamente han realizado una cosecha de agua y que por tanto sus niveles de descargas pueden ser mayores a sus consumos, siempre y cuando sus descargas se encuentren dentro de las normas; 4) fomentar la cosecha de agua en todos los usuarios, mediante su almacenamiento o inyección al acuífero para su aprovechamiento posterior en usos domésticos, sociales, comerciales e industriales, con lo que se revertiría el abatimiento del acuífero.

Garantizar el buen estado de los ecosistemas tiene implicaciones para todos los usuarios. Establecer una responsabilidad a los usuarios domésticos, por devolver el agua en las mejores condiciones, debe plantear si se les debe cobrar por el servicio de saneamiento o no. En caso de cobrarse, ¿debe ser pagado por todos los usuarios o únicamente por aquellos que consumieron por encima de su derecho humano, o solamente a los usuarios de las zonas

<sup>6</sup>Estas plantas no deben ser las macroplantas propuestas en otra época. Se puede proponer la instalación de microplantas en las unidades habitacionales y colonias que permitan el reuso de agua para sus áreas verdes, así como sectorizar zonas habitacionales como industriales para abaratar el tratamiento, evitar la contaminación de descargas residenciales con las industriales y separar gran parte de las aguas de lluvia para su aprovechamiento.

de mayores ingresos? En el caso de los usuarios comerciales-industriales, se debe determinar si se cobra igual para todos o se debe determinar la tarifa por la calidad de las descargas, como prevé la tarifa actual; no obstante, aplicar los lineamientos del principio precautorio implica que las descargas contaminantes se reducirían considerablemente.

Con respecto a la cosecha de agua y aprovechamiento de los flujos superficiales desperdiciados actualmente, hay una serie de cuestionamientos hidráulicos y financieros, ya que requieren la construcción de instalaciones adecuadas para su almacenamiento y canalización al acuífero; como menciona Legorreta (2006a), se requiere construir presas de mediana capacidad que se sitúen en las partes altas de la cuenca oriente, poniente y sur de la ciudad, entre otros.

*Tercero.* Garantizar de manera gratuita el agua para aquellas actividades de interés general, como son escuelas, centros deportivos y comunitarios, hospitales públicos, así como aquellas actividades que se encuentren registradas como asociaciones civiles sin fines de lucro. Para este uso también se fomentarían mecanismos que promuevan la cosecha del agua y faciliten su tratamiento y reuso.

*Cuarto.* Establecer un sistema tarifario que cobre el consumo de agua de aquellos usuarios domésticos que superen su “piso de dignidad” –se mencionó en el *punto uno* establecer ese derecho humano en  $10 \text{ m}^3$ . Para el caso de esta propuesta, se establecen bloques de consumo cada  $10 \text{ m}^3$ , y cuyas tarifas sean incrementadas proporcionalmente y de manera acumulativa, conforme el usuario se ubique en diferentes bloques de consumo.

Con nuestra propuesta, se otorgan los primeros  $10 \text{ m}^3$  de manera gratuita, que corresponden al derecho humano. Posteriormente, se determinaría establecer un primer bloque de consumo que vaya de  $10.1$  a  $20 \text{ m}^3$  con una cuota de 20 pesos (cuota establecida políticamente); el segundo bloque de consumo se determinaría de  $20.1$  a  $30 \text{ m}^3$  con una cuota de 50 pesos (cuadro 2).

La cuota de este bloque y de los sucesivos se establecería a partir de un incremento del 50% en la cuota con respecto al blo-

CUADRO 2

PROPUESTAS DE TARIFAS PARA EL AGUA DE USO DOMÉSTICO  
(comparativo con Saldivar) (consumo bimestral)

Bloque de consumo en m³	Propuesta de Saldivar		Propuesta 1 del GEEM		Propuesta 2 del GEEM	
	Cuota en pesos	Operación	Ejemplo para el consumo bimestral de una familia compuesta por cuatro personas		Ejemplo con un precio base de 20 pesos y un incremento proporcional de 50%	
0-10	90	9 m³/\$10 Más 1m³ gratis	Gratis	Derecho humano	Gratis	Derecho humano
10-20	190	19 m³/\$10 Más 1m³ gratis	20	Cuota establecida de manera política	40	Dos bloques de agua a \$20 c/u
20-30	350	24 m³/\$10 5 m³/\$22 Más 1m³ gratis	50	20+30(1)	90	Tres bloques de agua a \$30 c/u
30-40	570	24 m³/\$10 15 m³/\$22 Más 1m³ gratis	95	20+30+45(2)	180	Cuatro bloques de agua a \$45 c/u
40-50	790	24 m³/\$10 25 m³/\$22 Más 1m³ gratis	162	20+30+45+67.5(3)	337.5	Cinco bloques de agua a \$67.5 c/u

Notas: (1) 30=20 + (20\*0.5), (2) 45= 30 + (30\*0.5), (3) 67.5=45 + (45\*0.5).  
Fuente: Elaboración propia.

que anterior y le sumamos la cuota de los bloques anteriores; es decir, para este segundo bloque tenemos 20 pesos del primer bloque más 30 (20 pesos más 50% de incremento) del segundo bloque lo que nos da 50 pesos. En un tercer bloque, se establecería un consumo de 30.1 a 40 m<sup>3</sup> con una cuota de 95 (20 del primer bloque más 30 del segundo más 45 (30 pesos más 50%) del tercer bloque); y así sucesivamente para los bloques superiores. Esta propuesta busca establecer responsabilidades a los usuarios mediante el cobro de tarifas progresivas.

O, ¿por qué no?, establecer una cuota que realmente incentive a los usuarios que consuman por encima de su piso de dignidad a racionalizar su uso, ya sea cobrándoles todo su consumo, incluyendo su derecho humano, a la tarifa más alta (cuadro 2, propuesta 2) o simplemente cobrarles su consumo adicional a la tarifa más alta.

*Quinto.* Establecer una tarifa, que se incremente progresivamente por bloque para los usuarios comerciales e industriales, similar al ejemplo de los usuarios domésticos con la excepción de que aquí no tienen derecho a los primeros 10 m<sup>3</sup> de forma gratuita. Asimismo, se puede aplicar el punto dos de nuestra propuesta para el caso del uso del sistema de drenaje y alcantarillado de la ciudad, ya que estos usuarios son quienes tienen las descargas con mayores niveles de contaminantes. En este documento no se formula una propuesta específica para este uso, ya que ello requiere la participación de todos los sectores involucrados para definir la tarifa y el incremento porcentual.

Ahora bien, ¿qué sucede con los usuarios que cuentan con una concesión de pozo por parte de la Conagua? La respuesta es establecer mayor flexibilidad en las concesiones actuales que favorezcan al interés público, y que se exija la instalación de medidores en todos los pozos y el cobro para el uso del agua.<sup>7</sup>

*Sexto.* Con los ingresos que se obtengan mediante el cobro del uso residencial y de los usos comercial e industrial, se pueden

<sup>7</sup> Esto es posible en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) si se declara “emergencia hidráulica” (para más detalles, véase Artículo 9, apartado XL y L, Artículo 13 BIS 4, Artículo 39 BIS, Artículo 84 y Artículo 86 apartado X).

cubrir los costos por el servicio de agua de estos usuarios y asegurar el cumplimiento de la responsabilidad para los tres primeros usos fundamentales del agua. La propuesta consiste en determinar un sistema de subsidios cruzados de los grandes consumidores de agua (residencial y, en mayor medida, el comercial e industrial), hacia los derechos humanos fundamentales, los requerimientos ambientales y las necesidades sociales.

## CONCLUSIONES

CON esta propuesta elaborada aclaramos la complejidad de la gestión pública del agua para el Valle de México, una complejidad que prevalece en toda la República mexicana. Se trata, en este sentido, de evidenciar la necesidad de enfrentar los conflictos ecológicos distributivos y los lenguajes de valoración del agua de una manera alternativa a la impuesta por el modelo de la Conagua, orientado desde una racionalidad económica y centrada en el consumo domiciliario. Con ello, los principios de justicia social y de responsabilidad ambiental quedan sujetos a las lógicas del mercado, por lo que desvirtúa los atributos de un manejo sustentable del agua.

La contribución teórico-metodológica de la economía ecológica, en conjunto con el marco de la NCA, permite la elaboración de un diagnóstico y de un planteamiento alterno de un modelo de gestión del agua caracterizado por una mayor congruencia entre las responsabilidades sociales (equidad, justicia social, inclusión, democracia participativa) y las de tipo ambiental (termodinámicas y homeostáticas del ecosistema).

A partir de este diagnóstico, se formula un ejercicio técnico-metodológico en el que no se descarta el lenguaje de la valoración económica, sino que lo incluye, articula y subordina a los principios de justicia social, equidad, autosuficiencia regional (cuencas) y responsabilidad ambiental. La expresión empírica de dicha propuesta metodológica se expresa al contextualizar la noción de “escasez” y de compatibilizar la demanda de agua por parte de los

diferentes usos con la disponibilidad de agua con que cuenta la cuenca del Valle de México. Se rechazan, por ejemplo –a partir del principio de autosuficiencia regional en el uso del agua– las prácticas como el desaprovechamiento de grandes volúmenes de agua de lluvia, así como el agua de 48 ríos, que es enviada directamente al sistema de alcantarillado de la ciudad. En su lugar, se propone el aprovechamiento de estos grandes volúmenes, mediante la construcción de una infraestructura modesta de almacenaje, para reemplazar aquellos modelos de trasvase de agua que únicamente ocasionan un empobrecimiento y degradación en aquellas áreas donde se encuentra la población indígena.

Se destaca también la necesidad de operar la gestión pública del agua desde un escenario de democratización del acceso y uso del agua, así como una amplia participación social en su administración, regulación y vigilancia. La incorporación del principio de precaución en esta propuesta implica detener y evitar la degradación ambiental continua que sufre la cuenca. Además, se establecen mayores obligaciones, por medio de cuotas más altas, a quienes más consumen agua. Con esto, se puede contribuir a reducir y/o evitar los conflictos entre diferentes grupos; promover la citada justicia social y lograr un mejoramiento en el manejo ambiental. Es decir, un manejo del agua que represente los principios éticos de la NCA.

## BIBLIOGRAFÍA

- ÁVILA FOUCAT, Sophie *et al.* (comp.) (2003), *Economía de la biodiversidad*, Memoria del Seminario Internacional de la Paz, B.C., México, Semarnap-INE.
- ARROJO, P. (2006), “Las funciones del agua”, en D. Barkin (coord.), *La gestión del agua urbana en México: retos, debates y bienestar*, México, Universidad de Guadalajara, pp. 47-56.
- BALANYÁ, B., B. Brennan, O. Hoedeman, S. Krishimoto y P. Terhorst (coord.) (2006), *Por un modelo público de agua: triunfos, luchas y sueños*, Barcelona, El Viejo Topo y Corporate Europe Observatory, <http://www.tni.org>.



- BARKIN, D. (coord.) (2006), *La gestión del agua urbana en México: retos, debates y bienestar*, México, Universidad de Guadalajara.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (2004), *Ley de Aguas Nacionales*, México, Conagua.
- CÁMARA DE DIPUTADOS (2006), *Gaceta Parlamentaria*, núm. 2147-I, 7 de diciembre de 2006, <http://gaceta.diputados.gob.mx/Gaceta/60/2006/dic/20061207-I.html#Ini20061207Lavara>.
- DECLARACIÓN EUROPEA POR UNA NUEVA CULTURA DEL AGUA (2005), <http://www.unizar.es/fnca/docu/docu130.pdf>; <http://www.unizar.es/fnca/euwater/docu/declaracioneuropea.pdf>
- DURAIAPPAH, A.K. y F. Comim *et al.* (2005), "Consequences of Responses on Human Well-being and Poverty Reduction", en K. Chopra, R. Leemans, P. Kumar y H. Simons (eds.), *Ecosystems and Human Well-Being*, vol. 3, cap. 17, CA: Island Press, pp. 487-526.
- FERNÁNDEZ, E. (2005), "Compra-venta de pozos; negocios con el agua", *El Universal*, [http://www2.eluniversal.com.mx/pls/impreso/version\\_imprimir?id\\_notas=67991&tabla=ciudad](http://www2.eluniversal.com.mx/pls/impreso/version_imprimir?id_notas=67991&tabla=ciudad), consultado el 9 de mayo.
- FUNTOWICZ, S. y J. Ravetz (2000), *La ciencia posnormal. Ciencia con la gente*, Barcelona, Icaria.
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas (1976), *The law and the economic process*, Cambridge, Harvard University Press.
- (1994), "¿Qué puede enseñar a los economistas la termodinámica y la biología?", en K.F. Aguilera y V. Alcántara (comp.), *De la economía ambiental a la economía ecológica*, Barcelona, Icaria, pp. 301-319.
- LEGORRETA, J. (2006a), *El agua y la Ciudad de México: de Tenochtitlán a la megalópolis del siglo XXI*, México, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.
- (2006b), "Transformación y restauración lacustre de la Ciudad de México", en D. Barkin (coord.), *La gestión del agua urbana en México: retos, debates y bienestar*, México, Universidad de Guadalajara, pp. 313-321.
- MARTÍNEZ, A.J. (2005), *El ecologismo de los pobres*, Barcelona, Icaria.
- (2007), Conflictos ecológicos y lenguajes de valoración: las relaciones entre la economía ecológica y la ecología política, Conferencia Magistral Inaugural durante el III Congreso iberoamericano sobre desarrollo y ambiente, San José de Costa Rica.
- MUNDA, G. (2004), "Métodos y procesos multicriterio para la evaluación social de las políticas públicas", *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, vol. 1, pp. 31-45.

- RIECHMANN, J. y J. Tickner (coords.) (2002), *El principio de precaución, en medio ambiente y salud pública: de las definiciones a la práctica*, Barcelona, Icaria.
- SALDÍVAR, A. (2006), “Valorar el agua: ¿gratuidad o sustentabilidad?”, *Memoria*, núm. 207, México, UNAM.
- TOLEDO, V.M. (2008), “Metabolismos rurales: hacia una teoría económico-ecológica de la apropiación de la naturaleza”, *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, vol. 7.

PEDRO MOCTEZUMA BARRAGÁN\*  
Y ÓSCAR MONROY HERMOSILLO\*\*

*La planeación colaborativa en la  
gestión integral de cuencas amenazadas.  
El caso de la cuenca de los ríos Amecameca  
y La Compañía*

INTRODUCCIÓN

LOS BALANCES HÍDRICOS en la Cuenca de México muestran un decremento en la capacidad para satisfacer la demanda de los usuarios asentados en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). La última región intacta para la recarga de los mantos acuíferos del Valle de México se ubica en las áreas de transición de las permeables faldas de la Sierra Nevada y el Chichinautzin, cuyas corrientes subterráneas fluyen hacia el acuífero Chalco-Xochimilco. Sin embargo, la vertiginosa dinámica de crecimiento poblacional genera anillos de crecimiento periurbano cada vez más expansivo que impermeabilizan dicha subcuenca.

Se requieren figuras adecuadas para la gestión integral de cuencas estratégicas que hagan posible realizar diagnósticos, desarrollar planes y lograr su ejecución. De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales (LAN), la Comisión de Cuenca es la instancia de toma de decisiones y responsabilidades en relación con el manejo de una subcuenca, en este caso, la subcuenca de los ríos Amecameca y La Compañía. Se está formando como organismo auxiliar al Consejo de Cuenca del Valle de México usando modos de planeación colaborativa que buscan crear la visión y encontrar los mecanismos capaces de integrar organizaciones y actores separados en términos de intereses, recursos, cultura, valores, poder y características estructurales.

\* Coordinador general del Programa de Investigación Sierra Nevada, Universidad Autónoma Metropolitana.

\*\* Profesor-investigador del Departamento de Biotecnología. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.

Un factor clave para la génesis de este tipo de colaboración es la formación de grupos promotores interinstitucionales con capacidad de convocatoria que tomen la iniciativa. Las universidades tienen dicha capacidad; además pueden asumir un compromiso permanente con los procesos de planeación, promoviendo amplia participación de aquéllos y sobre todo, su ejecución. La Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), junto con autoridades municipales, estatales y federales, ejidos, comunidades y organizaciones cívicas, formó en mayo de 2006 el Grupo Promotor de dicha comisión en la mencionada subcuenca. En este trabajo se analizan y se problematizan las características de dicho proceso, así como las fases que ha comprendido, los grupos especializados que perfila y los elementos esenciales que lo están haciendo posible.

#### EL CONTEXTO: UNA CUENCA AMENAZADA

DE LOS 104 mantos acuíferos que sufren diversos grados de sobreexplotación en nuestro país, los siete más dañados se ubican en la Cuenca de México. El déficit hídrico en dicha cuenca ha producido un desequilibrio ambiental (Breña, 2005; Mazari-Hiriart *et al.*, 2004). La hipótesis sostenida por Ezcurra y otros autores (2001: 49-50) que “debido a la extracción desmedida incluso sin crecimiento, y de conservarse la población actual, se mantiene la posibilidad de un gran colapso poblacional en el AMCM” y mencionan las dos causas más preocupantes en relación con el agua: “la contaminación masiva del acuífero por agrietamiento de arcilla en la subcuenca Chalco-Xochimilco, estimada ya en un corto tiempo, alrededor de 25 años o el agotamiento de agua en la subcuenca de Zumpango”.

El único de los mantos acuíferos de los que se nutre la Cuenca de México, con un nivel de sobreexplotación relativamente moderado (74%), es el acuífero Chalco-Amecameca. Si se logra detener el deterioro en la región de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl y restaurar su ambiente natural, la Cuenca de Méxi-

co contaría con una reserva estratégica de recursos naturales y condiciones adecuadas para la recarga de dicho acuífero.

LA SIERRA NEVADA:  
EL “PLATO HONDO” DE CAPTACIÓN  
DE AGUA PARA EL VALLE DE MÉXICO

ESTA región está formada por los macizos montañosos de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, y del Chichinautzin que delimitan la Cuenca de México hacia el oriente y el sur. Sus bosques y suelos son vitales para la producción de oxígeno y la recarga de los mantos acuíferos del Valle de México. El sistema orográfico presidido por los volcanes forma un “plato hondo” conformado por las permeables faldas de la Sierra Nevada y el Chichinautzin. La Sierra Nevada Poniente cubre 13% de la superficie total de la Cuenca de México (7,000 km<sup>2</sup>). Este “plato hondo” representa la última zona intacta para la recarga de los mantos acuíferos del Valle de México.

Esta zona ambiental estratégica está en riesgo. La Sierra Nevada colinda al poniente y al norte con los municipios de mayor crecimiento urbano en la ZMCM (Aguilar *et al.*, 2003). El escenario tendencial del crecimiento a futuro en la Sierra Nevada es preocupante. Más aún cuando recientemente, la Comisión Nacional de Fomento a la Vivienda (Conafovi) eliminó “trabas burocráticas” para que las empresas constructoras puedan generar soluciones inmediatas y visibles al déficit de vivienda. A esta política se suma el proceso en curso de construcción de una autopista de ocho carriles sobre la zona estratégica de recarga promocionada como “periférico habitacional”.<sup>1</sup>

De no revertirse las tendencias actuales, en poco tiempo, la región se podría convertir en una extensión de la mancha urbana caótica. La urbanización de las zonas de recarga no permite la

<sup>1</sup> Promocionada por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) como “periférico habitacional”, el trazo de esta autopista que pretende ser acotada y de cuota, abre el suelo rural a la especulación, corta las vialidades actuales entre las comunidades y sus caminos, saca cosechas y entra directamente en zonas de alto y mediano riesgo volcánico.

infiltración del agua llovida sobre su superficie, adicionalmente, los nuevos habitantes aumentan la demanda por agua subterránea, reduciendo las cantidades recargadas, acelerando la tasa de hundimiento<sup>2</sup> y aumentando la presión sobre el sistema de desagüe metropolitano que exporta 45 m<sup>3</sup>/segundo de aguas servidas a la Cuenca de Tula en Hidalgo.<sup>3</sup> Ello afectaría permanentemente la dotación de agua potable a los habitantes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Los 13 municipios del sudeste del Estado de México son Amecameca, Atlautla, Ayapango, Cocotitlán, Chalco, Ecatzingo, Ixtapaluca, Juchitepec, Ozumba, Tenango del Aire, Temamatla, Tepetlixpa, Tlalmanalco. Éstos forman parte de una región integrada por características históricas, culturales, geográficas y sociales comunes.

En general, la región se encuentra amenazada por la expansión urbana, la pérdida de tierras agrícolas, plagas forestales, tala clandestina, tiraderos a cielo abierto, etcétera. De continuar las tendencias del crecimiento en la zona, se puede inferir que para el año 2020, podrían estar conurbados todos los poblados de la región.

### *Planeación colaborativa*

La planeación colaborativa ha sido desarrollada para ofrecer alternativas viables en condiciones de turbulencia y en ámbitos problemáticos, al integrar una multiplicidad de actores para buscar soluciones a problemas que no pueden ser resueltos unilateralmente y para allegarse recursos tangibles o intangibles (Margerum, 2002; Ruelas, 2004).

Hay casos en los cuales la planeación es usada para cumplir por contrato con requisitos institucionales o recabar material académico, recursos para alcanzar un objetivo limitado de interés para las partes, sin evaluar ni redefinir las problemáticas. A esta colabo-

<sup>2</sup> Los pozos profundos de la región seguirían bajando entre 1.2 y 2 metros al año, mientras la superficie de los municipios al poniente de la región seguirá hundiéndose entre 40 y 80 cm/año (Breña, 2005; Mazari *et al.*, 2001).

<sup>3</sup> Tanto el agua no infiltrada como la que se extrae para los nuevos desarrollos habitacionales requiere ser posteriormente desalojada por bombeo a través de la zona metropolitana.

ración, Raufflet (2005) la llama “transaccional”. En cambio, el mismo autor acuñó el concepto de “colaboración transformativa”, para dar cuenta de un proceso distinto al anterior, regido por valores comunes y la búsqueda de construcción de una visión común dirigida a transformar las relaciones y prácticas sociales. Esta forma de colaboración conduce a cambios institucionales.

Dicha forma de planeación implica “un proceso participativo y contenidos comprensivos, cuyos resultados emergen de la definición de campos problemáticos definidos sobre la marcha por los mismos participantes, más que habiendo sido definidos *a priori*, una colaboración transformativa contribuye a nuevas definiciones de los problemas y genera nuevas posibilidades de acción colectiva” (Raufflet, 2005: 183-184).

La planeación colaborativa contribuye al proceso de desarrollo local sustentable, incorporando a los actores y propiciando dinámicas de apropiación local, se facilita la realización de los planes y la integración vertical y horizontal de los participantes (Moctezuma *et al.*, 2006). La articulación de dinámicas “desde abajo” con iniciativas “desde arriba” fortalece los marcos institucionales indispensables para una planeación efectiva; asimismo, la coordinación horizontal de los actores dentro de la comunidad y en el interior de las instituciones favorece la planeación, el seguimiento de los acuerdos y las innovaciones consensuadas.

## SUS DIVERSOS ACTORES

LA LISTA de actores (entre éstos los comunitarios), que participan en actividades de desarrollo regional en la Sierra Nevada incluye a ejidos y bienes comunales, escuelas, uniones de pueblos y colonias, grupos ambientalistas, grupos cívicos, empresas locales y organizaciones culturales, las cuales han comenzado a tejer redes horizontales de acción local.

Sin embargo, para generalizar propuestas, replicarlas y lograr economías de escala se requiere el vínculo con las autoridades municipales, estatales, federales y los organismos internacionales. No podemos ser ingenuos en cuanto a que los fenómenos de

corrupción, la partidización y el “grupismo”, producto de la polarización social así como la ineficiencia burocrática predominante, dificultan enormemente estas tareas, sin embargo, precisamente por ello se requieren funcionarios que funcionen, una cultura de servicio y la corresponsabilidad ciudadana para lograr proyectos emblemáticos que abran brecha.

### *Situación social y comunitaria*

Consideramos que el papel principal en el proceso de generación de alternativas sustentables lo desempeñan los actores comunitarios. México cuenta con experiencias ancestrales en el manejo comunitario de recursos naturales y fue uno de los primeros países en generar un marco institucional y experiencias organizativas que demostraron el potencial de este tipo de manejo.

Sin embargo, el manejo comunitario de recursos en la región vive varias paradojas (Raufflet, 2005). La distribución del ingreso en la Sierra Nevada es más inequitativa que en el resto del Estado de México.<sup>4</sup> No obstante, el nivel de ingresos no es fiel representante de las condiciones materiales de vida de los habitantes de la región hasta ahora, debido a la existencia de una economía doméstico-campesina muy consolidada y arraigada en la población, así como formas de organización comunitaria aún en control de importantes recursos naturales. Lo anterior es notable, pues se ha publicado una gran cantidad de estudios que han servido de evidencia para comprobar la capacidad que tienen las organizaciones comunitarias para el manejo sustentable de sus recursos (Ostrom, 2000).

Se señaló antes que, dentro de los actores comunitarios en la Sierra Nevada, destacan algunas organizaciones ejidales, comu-

<sup>4</sup> Mientras que a nivel estatal 66.23% gana menos de 2 vssm y 8.12% más de 5 vssm, en la región el 73.58% gana menos de 2 vssm y 4.85% más de 5 vssm. En el contexto de los ingresos antes mencionados y considerando que de cada salario dependen otras tres personas en la región, se infiere que la capacidad adquisitiva en los habitantes de la región está muy deteriorada, ya que, si tomáramos como único referente el nivel de ingresos se podría afirmar que más de 95% de la población no puede adquirir la canasta básica.



nales, centros educativos, industriales, grupos cívicos y culturales, así como funcionarios locales. En relación con los últimos, los actores municipales ejercen un papel formal clave. Los Ayuntamientos de la región cuentan con amplias competencias de acuerdo con el artículo 115 constitucional, mismo que establece el plazo de gobierno a tres años, considerado como un corto plazo para transformar la lógica del desarrollo (GTZ, 2006). Sin un esquema de concurrencia con el gobierno estatal o con el gobierno federal, ni con mecanismos que garanticen la aplicabilidad de políticas y programas, los ayuntamientos ven limitadas sus posibilidades de incidir en dinámicas transformativas, a menos que acepten las iniciativas comunitarias o generen procesos de colaboración “desde abajo”.

Algunos autores (Plummer, 2005) señalan los frecuentes cuestionamientos a la colaboración entre autoridades municipales y comunidades locales, debido a la “falta de convergencias éticas y políticas”, sin embargo, defienden su necesidad para lograr cambios tanto en el grado de influencia de los esfuerzos comunitarios como en las políticas públicas. Gaventa (2001) concuerda con los planteamientos anteriores y añade que paradójicamente, por otro lado, la intervención del centro es muy frecuente para disolver los bloqueos a escala local de grupos cerrados al cambio.

#### UN NUEVO PARADIGMA UNIVERSITARIO PARA LA PROMOCIÓN DEL DESARROLLO REGIONAL

VIVIMOS en un periodo histórico en donde los paradigmas comienzan a agotarse al toparse con una gran variedad de límites ambientales. Para mencionar algunos ejemplos, además de la sobreexplotación de mantos acuíferos, se pueden citar la crisis por la pérdida de suelos agrícolas de alta productividad, la gestión de residuos sólidos; el manejo de plagas en zonas forestales de importancia estratégica para la biodiversidad, las emisiones de carbono, los patrones de crecimiento insustentables (Burns, 2005).

Para comprender los efectos ambientales de dichas dinámicas críticas y estar en condiciones de revertirlas se requiere un

cambio de paradigma académico, ello implica el reto de lograr una ciencia cercana a los procesos sociales. El vehículo es la integración de miembros de la comunidad universitaria a procesos de inserción, aprendizaje y promoción en las comunidades locales, y la vinculación permanente de la universidad con su entorno social y ambiental.

El Programa de Investigación Sierra Nevada<sup>5</sup> nació con un planteamiento teórico metodológico inherente que combina la planeación colaborativa con metodologías técnico-participativas dirigidas a contribuir a la gestión integral de cuenca.

#### LA UAM Y SU PARTICIPACIÓN EN LA PLANEACIÓN COLABORATIVA EN LA SIERRA NEVADA

EN UN contexto de turbulencia social y política en la vida nacional y fragmentación de las dinámicas institucionales, la UAM, como universidad pública, ha buscado convocar a múltiples actores a dinámicas colaborativas de desarrollo regional en el sudeste de la Cuenca del Valle de México y asumir un compromiso permanente con los procesos. Este esfuerzo identificó la planeación espacial colaborativa como instrumento que permite la confluencia de actores clave para el diagnóstico, planeación estratégica y la puesta en marcha de diversos planes y programas de desarrollo sustentable.

Si bien la dinámica social en la Sierra Nevada permite observar múltiples diferencias e intereses entre sus habitantes (actores primarios), así como en otros actores, se puede apreciar que la dinámica de asociación tiene como factor cohesionador la “construcción” de una visión común en un proceso que permite generar valores positivos, como el afecto y la transparencia, y actitudes

<sup>5</sup> El proyecto “Alternativas sociales y ecológicas para el sudeste del ZAMCM” iniciado en junio de 1990 desde la maestría de Planeación Metropolitana, de UAM-A, después de un periodo de inserción, y con el concurso del Área de Estudios Rurales y Urbanos del Departamento de Sociología, de UAM-I y el Departamento de El Hombre y su Ambiente, de UAM-X, se convierte en marzo de 1997 en el Proyecto UAM-Comunidad Sierra Nevada. En mayo de 2005, el Colegio Académico de la Universidad Autónoma Metropolitana lo eleva al rango de Programa de Investigación Sierra Nevada (PISN).

heurísticas como la investigación colaborativa y la recuperación de las raíces culturales de una región que fue cuna de Nezahualcōyotl y Sor Juana Inés de la Cruz, entre otros, y rechazar el principio del enemigo común (*common foe*). Como motor de la acción, posibilita alimentar valores positivos como fuente de generación de lealtades originando “fenómenos colectivos de grupo” (Alberoni, 1984) que conjuga los valores y sentimientos de sus miembros, comunicación y aprendizaje en común.

El compromiso del proceso impulsado por la UAM es incluir al mayor número posible de actores, puesto que las dinámicas de consenso entre los participantes es garantía de legitimidad y el mejor modo de involucrar a todos los componentes en la formulación de un plan sólidamente elaborado y de ejecución exitosa. La asociación entre profesores-investigadores de la UAM y los miembros de la capa más activa y comprometida de la región ha permitido promover una red regional que se reúne anualmente en Encuentros Regionales para el Desarrollo Sustentable.

El eje sobre el cual se ha dado la diversidad de proyectos de investigación, docencia y servicio social de la UAM ha sido la identificación, evaluación y reorientación de dinámicas críticas de manejo del agua, los recursos forestales, la biodiversidad, los suelos agrícolas y los residuos sólidos, para lograr sistemas de manejo sustentables, mediante procesos continuos de construcción colaborativa de conocimientos y capacidades entre la universidad, las comunidades y los tres niveles de gobierno.

El proceso de planeación del desarrollo sustentable incluyó planes de desarrollo municipal (entre 1997 y 2000), un plan regional de desarrollo urbano sustentable seguido de los planes de desarrollo urbano municipal (entre 2001 y 2003), programas municipales de prevención y gestión integral de residuos sólidos (entre 2004 y 2005), el Programa de Ordenamiento Ecológico del volcán Popocatepetl y su zona de influencia y su bitácora para los municipios pertenecientes a la Sierra Nevada y la creación del Sistema de Monitoreo Regional para evaluar y anunciar avances y retrocesos.

El proceso que llevó a los diferentes logros enumerados, coadyuvó en la construcción de nuevos sujetos sociales en la región,<sup>6</sup> los cuales han desempeñado un papel clave en diversas dinámicas de investigación participativa y planeación colaborativa. Dentro de éstos destacan, Estudios y Proyectos Sierra Nevada SC y Guardianes de los Volcanes AC que se han convertido en corresponsables, junto con la Universidad Autónoma Metropolitana, de diversos proyectos. Asimismo, el Programa también maneja 64 hectáreas forestadas en el predio “El Faro” decretadas como Área Natural Protegida en agosto de 2003.

#### CONSTRUCCIÓN DE UNA VISIÓN COMÚN Y CREACIÓN DE CAPACIDADES

PARA lograr una gestión integral del agua es necesario socializar la problemática hídrica y construir un sentido de colectividad buscando la participación amplia en la construcción de redes e instancias locales, trabajando no sólo con distintas instancias académicas y gubernamentales, sino con sectores de la sociedad desfavorecidos frente a los intereses especulativos y grandes inversiones que rompen el equilibrio sustentable.

Para la transformación de los sistemas de degradación en sistemas de manejo sustentable, el Centro para la Sustentabilidad “Incalli Ixcahuicopa” es un espacio que nuestra Universidad construye actualmente como sede de estas actividades y para propiciar el manejo comunitario y sustentable con tecnologías cercanas a la gente, buscando identificar puntos privilegiados de intervención. Uno de los objetivos de este centro es la construcción de capacidades en las universidades, comunidades, las autoridades locales, los consejos y otros organismos auxiliares.

Entre mayo y julio de 2006, con el centro antes mencionado, todavía en proceso de construcción, se realizó un Taller de Gestión Ambiental Municipal dirigido a las recién electas autoridades

<sup>6</sup>Consejo Social Iztacáhuatl AC, Estudios y Proyectos Sierra Nevada SC, Asociación Ecoturística Tlaxaloni, Asociación de Productores de Leche de Santo Tomás y Guardianes de los Volcanes, AC.

municipales y a actores locales en el que se tocaron diversos temas relacionados con el desarrollo sustentable y se propició el diálogo entre los distintos actores gubernamentales y la comunidad. Importa continuar acercándose a los sectores tomadores de decisiones, tanto en relación con las tres escalas de gobierno: federal, del Estado de México, DF, municipios y delegaciones políticas, así como con legisladores, para construir una visión común para la Cuenca.

### *La construcción de grupos promotores*

Un factor catalizador en este proceso regional es la formación de grupos promotores interinstitucionales que tomen la iniciativa de convocar e impulsar las primeras tareas de diagnóstico y construcción de una visión conjunta de la problemática local y regional.

Estas instancias promotoras pueden contribuir de modo clave a tender puentes entre entidades previamente separadas y a desanudar trabas interinstitucionales, para habilitar procesos de coordinación. En vez de competir sector contra sector por atribuciones, presupuesto público, información y contactos, los involucrados se benefician al depositar en un fondo común sus aportaciones y aprovechar las sinergias. Los grupos promotores pueden coordinarse para apoyar procesos demostrativos a escala regional, para difundir mejores prácticas y gestionar asesoría técnica, desde el intercambio entre sus miembros a las gestiones con instancias de cooperación para generar círculos virtuosos que atraigan recursos para la puesta en marcha de políticas e instrumentos de gestión hídrica.

### *El Grupo Promotor de la Comisión de Cuenca de los ríos Amecameca y La Compañía*

La Subcuenca de los ríos Amecameca y La Compañía cuenta con las condiciones necesarias para tomar pasos significativos para cambiar la lógica de manejo del agua hacia un manejo sustentable. Un factor clave para lograr dicho fin fue la formación en 2006 de un

grupo de promotores interinstitucional, con capacidad de convocatoria. La UAM, como universidad pública, ha cumplido ese papel en la Sierra Nevada, asumiendo compromisos permanentes con los procesos de planeación, promoviendo amplia participación en éstos y sobre todo, en su ejecución.

La formación del Grupo Promotor de la Comisión de Cuenca de los ríos Amecameca y La Compañía se logró en el contexto del Taller de Gestión Ambiental Municipal, el día 20 de mayo de 2006, en Tlalmanalco, Estado de México. Dicho acto se llevó a cabo con la participación del Coordinador del Consejo de Cuenca del Valle de México, de los representantes de 11 ayuntamientos, (incluidos seis presidentes municipales electos), la Comisión Nacional del Agua (Conagua), la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM), organismos descentralizados de agua potable y saneamiento, el Parque Nacional Izta-Popo, autoridades agropecuarias, usuarios, universitarios y miembros de las comunidades. Posteriormente, en su sesión núm. 24, realizada el 22 de mayo de 2006, en Xalostoc, el Grupo de Seguimiento y Evaluación del Consejo de Cuenca del Valle de México<sup>7</sup> reconoció a dicho Grupo Promotor.

El Grupo Promotor de la Comisión de Cuenca retoma los planes y proyectos acordados por el proceso de Ordenamiento Ecológico Regional del volcán Popocatepetl y su Zona de Influencia. Este ordenamiento que está por decretarse<sup>8</sup> es resultado de años de trabajo por parte de maestros, alumnos, ejidatarios, funcionarios locales, asociaciones cívicas, mujeres y grupos culturales en la elaboración de diagnósticos y propuestas para la región.

La Comisión de Cuenca tendrá que atender las 107,702 hectáreas de la Subcuenca de los ríos Amecameca y La Compañía, incluida la parte de los municipios de Ixtapaluca, Chalco, Cocoti-

<sup>7</sup>El Consejo de Cuenca del Valle de México es la instancia de coordinación, concertación, apoyo, consulta y asesoría, entre la Conagua, las dependencias, entidades, estatal o municipal y los representantes tanto de los usuarios del agua como de las organizaciones de la sociedad de la respectiva cuenca hidrológica, con objeto de formular y ejecutar programas y acciones para la mejor administración de las aguas, el desarrollo de la infraestructura hidráulica, de los servicios respectivos y la preservación de los recursos naturales de la cuenca, en el marco de la gestión integrada de los recursos hídricos.

<sup>8</sup>El ordenamiento ecológico fue decretado a los pocos meses de presentada esta ponencia en la *Gaceta Oficial del Gobierno del Estado de México*, el 8 de febrero de 2007.

tlán, Temamatla, Tlalmanalco, Tenango del Aire, Ayapango, Amecameca, Juchitepec, Atlautla y Valle de Chalco, y las delegaciones de Tláhuac, Milpa Alta y Xochimilco. Asimismo, buscará lograr acuerdos y consensos entre los titulares de las 101 concesiones de agua en la región.

El volumen total de estas concesiones en la subcuenca es de 121 millones de m<sup>3</sup>/año, de los cuales 90% son de agua subterránea y 10% para el uso de ríos y manantiales. Los usuarios son del sector público urbano (78%), agricultores (10%), industrias (5%), ganaderos (3%), múltiples (3%) y servicios (0.1%). Además de los concesionarios, se tendrá que involucrar a los sectores de la sociedad con injerencia en la gestión del agua, los cuales incluyen productores forestales, educadores, empresas ecológicas, proyectos de turismo, investigadores y agricultores, entre otros.

Entre junio y noviembre de 2006, se llevaron a cabo siete reuniones amplias de diagnóstico y de difusión sobre el proceso de construcción de la Comisión de Cuenca, rotando la sede en los palacios municipales de Juchitepec, Amecameca, Tlalmanalco, Chalco e Ixtapaluca, Estado de México. En dichas reuniones han participado la Secretaría de Medio Ambiente, particularmente el coordinador de Proyectos Especiales, y la Dirección de Ordenamiento Ecológico estatal, autoridades municipales locales, titulares de concesiones locales y sectores de la sociedad con incidencia en la gestión del agua. Desde la constitución del Grupo Promotor, se ha participado en todas las reuniones de la Comisión de Seguimiento del Consejo de Cuenca del Valle de México.

Cabe destacar que el Grupo Promotor acordó priorizar en este periodo la participación de los municipios mexiquenses y esperar a que los cambios gubernamentales en el DF le permitieran contactar a los interlocutores permanentes. A partir del próximo año, se iniciará la construcción de su estructura, conformando comités de usuarios y de sectores, en los cuales desempeña un papel clave el licenciado Luis Mariano Rojas, coordinador del Consejo de Cuenca del Valle de México. Dicha estructura comprende los siguientes comités de usuarios: industrial, público urbano, agrícola, múltiple, y los siguientes comités de sectores: asociaciones cívicas,

asociaciones turísticas, empresas verdes, forestal, universidades y productores agrícolas. Una vez hecho esto, se promoverán los acuerdos interinstitucionales para lograr la participación comprometida de las dependencias estatales y federales involucradas en el manejo de recursos hídricos, agrícolas y forestales.

## CONCLUSIÓN

LA DINÁMICA insustentable en el manejo hídrico de la zona estratégica de recarga hídrica de la Cuenca de México puede ser frenada y revertida a la larga con dinámicas de planeación colaborativa como las que se iniciaron en la Sierra Nevada y fueron expuestas.

Lo anterior exige compromiso y cambios en los modos de ligar tareas de investigación, docencia, difusión y vinculación. La UAM ha hecho el compromiso de construir ese futuro poniéndose al servicio de las comunidades de la cuenca y contribuyendo con la población local, las organizaciones comunales y las autoridades para lograr de modo colaborativo la realización de diagnósticos, el desarrollo de ordenamientos y planes, así como, lo más importante, su ejecución.

Estamos a tiempo para rescatar esta vital zona de recarga si contenemos el crecimiento urbano irracional hacia zonas vitales en el oriente de la Cuenca de México. Ello implica construir las políticas, programas e instrumentos capaces de identificar las oportunidades para captar el agua de lluvia, tratar las aguas residuales y reutilizarlas, así como diseñar las políticas de infiltración.

Se debe revertir la extracción excesiva de aguas subterráneas, promover el rescate de los ríos Tlalmanalco y Amecameca. Aún hay que llevar a cabo labores de conservación y manejo sustentable desde la cuenca alta para retener el agua de lluvia con terrazas, represas y dinámicas de reforestación. Se deben promover los usos agroforestales del suelo, así como desarrollar iniciativas agroecológicas y actividades limpias en la cuenca media y finalmente, priorizar el rescate de las chinampas y humedales en la cuenca baja.



## BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR, A., P. Ward, y C.B. Smith (2003), "Globalization, regional development and mega-city expansion in Latin America: analyzing Mexico City's peri-urban hinterland", *Cities*, núm. 20, vol. 1, pp. 3-21.
- ALBERONI, F. (1984), *Movement and institution*, Nueva York, Columbia University Press.
- BREÑA, P.A. (2005), *Gestión integral del agua en el Área Metropolitana de la Ciudad de México*, Seminario internacional repensar la metrópoli, México, UAM.
- BURNS, E. (ed.) (2000e), *Atlas municipal de recursos naturales de Amecameca*, Tlalmanalco, Estado de México, UNDP-Semarnap-Sedesol-CSF-UAM.
- (2005), *¿De dónde vendrá nuestra agua?*, Guía hacia la sustentabilidad en la Cuenca de México, México, Comisión Ambiental Metropolitana-Programa UAM Sierra Nevada.
- EZCURRA, E., M. Mazari-Hiriart, I. Pisanti y A. Aguilar (1999), *The basin of Mexico, critical environmental issues and sustainability*, Tokio, United Nations University Press.
- , M. Mazari, L. de la Torre y M. Mazari-Menzer (2001), "Ciudad de México: dependiente de sus recursos hídricos", *Ciudades*, núm. 51, pp. 42-51.
- GAVENTA, J. (2001), "Towards Participatory local governance: six propositions for discussion", paper for LOGO Program Officers Retreat, junio, Sussex, Institute of Development Studies.
- GTZ (2006), *Prevención y gestión integral de residuos sólidos urbanos. Experiencias de nueve años de cooperación técnica alemana en México*, México, Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit.
- KASPERSON, J., R. Kasperson y B.L. Turner (1995), *Regions at risk: comparisons of threatened environments*, Tokio, United Nations University Press.
- (1999), "Preface", en E. Ezcurra, M. Mazari-Hiriart, I. Pisanti y A. Aguilar (eds.), *The basin of Mexico, critical environmental issue and sustainability*, Tokio, United Nations University Press.
- MARGERUM, R. (2002), "Evaluating collaborative planning", *Journal of the American Planning Association*, núm. 68, vol. 2, pp. 179-193.
- MAZARI M., R. Domínguez y E. Cifuentes (2004), "El agua en el Valle de México", en B. Jiménez y L. Marín, *El agua en México vista desde la academia*, México, Academia Mexicana de Ciencias.

- MOCTEZUMA, P. (2005), "Participatory planning under the mexican volcanoes", en T. Shakur (ed.), *Cities in transition: transforming global built environment*, Open House Press, Cheshire.
- , A. de la Torre y R.M. Espinoza (2006), "¿A dónde irá nuestra basura?", México, Comisión Ambiental Metropolitana-Programa UAM Sierra Nevada, Serie *Incalli Ixcahuicopa*.
- OSTROM, E. (2000), *El gobierno de los bienes comunes. La evolución de las instituciones de acción colectiva*, México, FCE.
- PLUMMER, J. (2000), *Municipalities and community participation*, Londres, Earthscan.
- RAUFFLET, E. (2005), *Las paradojas del manejo forestal: la experiencia de Tlalmanalco*, Mexico, UAM-Iztapalapa-Plaza y Valdés.
- RUELAS, M.L. (2004), *A collaborative approach to water allocation in a coastal zone in Mexico*, PhD Thesis, The University of Liverpool.

MARTA M. CHÁVEZ CORTÉS\*  
Y JUAN M. CHÁVEZ CORTÉS (†)

## *El enfoque de estudios integrales en la planeación de la conservación del agua*

LA NECESIDAD DE INTEGRAR  
LA PLANEACIÓN DEL PAISAJE Y EL AGUA  
EN EL MARCO DE LA SUSTENTABILIDAD

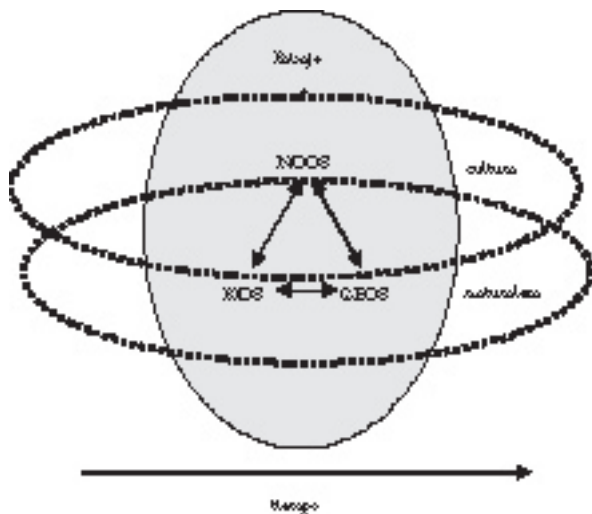
ACTUALMENTE, MANTENER EL agua dulce pura y restaurar su calidad se han vuelto elementos clave en la transición hacia la sustentabilidad regional, pues el agua es vital para la supervivencia y el funcionamiento de los ecosistemas y las sociedades humanas. Además, es un integrador del paisaje tanto en el espacio como en el tiempo. Los flujos de materia, energía, organismos e información vinculados con el agua, junto con sus procesos químicos, físicos y biológicos asociados, dan como resultado relaciones sinérgicas y corológicas entre todos los componentes del paisaje natural y cultural, terrestre y acuático, superficial y subterráneo (Falkenmark, 2003).

El agua dulce también moldea los componentes de la región-paisaje y afecta significativamente las características y patrones del ecosistema (relieve, suelo, comunidades bióticas, flujo de nutrientes y especies), a las sociedades humanas (demografía, cultura y economía), así como su cambio a lo largo del tiempo. De esta manera, influye de manera importante sobre las características y evolución de la región-paisaje. Esta perspectiva del agua como integradora de la región-paisaje lleva a definir a esta última desde un punto de vista completo y de carácter transdisciplinario, tal como lo han propuesto Tress y Tress (2001) (figura 1). Siguiendo

\* Profesora-investigadora del Departamento El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco [ccmm1320@correo.xoc.uam.mx].

este paradigma, el paisaje, además de ser una construcción mental, es una unidad biogeográfica, un sistema complejo y dinámico en donde se integran la naturaleza y la sociedad (Slocombe, 1993; Christensen *et al.*, 1996; Yaffee, 1999; Tress y Tress, 2001).

FIGURA I  
EL CONCEPTO TRANSDISCIPLINARIO DEL PAISAJE



Fuente: Tress y Tress, 2001.

En otro contexto, asumir el agua desde una perspectiva regional ha resultado de la crisis global del agua que empezó en el siglo xx y que amenaza con empeorar en el futuro. Su magnitud queda manifestada por algunas cifras alarmantes: más de 1,000 millones de personas no tienen acceso al agua potable, alrededor de 2,500 millones no cuentan con los servicios adecuados de saneamiento y sufren de enfermedades relacionadas con el agua (Glieck, 2001). La mitad de los ríos y lagos en el mundo está contaminada (Serageldin, 1999, en Ferreira y Botequilha, 2006).

Los problemas de agotamiento, salinización y contaminación afectan ampliamente los acuíferos subterráneos del mundo (Kund-

zewicz, 1997; Naiman *et al.*, 1998; Sánchez y Sánchez, 1998). De los residuos sólidos arrojados a los cauces, cerca de 50% no se recolecta (Kalbermatten *et al.*, 1999). Por todo ello, hay acuerdo en la idea de que la presión hídrica sobre las poblaciones humanas y los ecosistemas, así como los conflictos por el agua, continuarán aumentando en el futuro si la tendencia en su uso y manejo no cambia (Duda y El-Ashry, 2000; Naiman y Turner, 2000 en Ferreira y Botequilha, 2006).

Estas tendencias son el resultado de la aplicación de modelos tradicionales basados en la sectorización y la tecnología, y han mostrado su falta de efectividad para prevenir o resolver esta crisis, fundamentalmente, por desestimar las relaciones inherentes del agua con otros componentes de la región-paisaje y por la escasa cooperación entre los distintos sectores para la búsqueda de acciones concertadas.

En este mismo orden de ideas, distintos autores coinciden en que la falla de estos modelos para resolver la crisis del agua y otras problemáticas ambientales es haberlas abstraído de la complejidad del mundo real (Van-de-Kerkhol y Leroy, 2000; Tress y Tress, 2001). La sobresimplificación de la realidad en el manejo del agua resalta cuando se define a las dimensiones científico-técnica y económica como los únicos aspectos clave en la solución de sus problemas de manejo. Esta perspectiva deja de lado las dimensiones de análisis social, cultural, política e institucional, las cuales, junto con la económica y científica, se problematizan mutuamente en el mundo real, impidiendo que los problemas se interpreten en su sentido más amplio posible (Costanza, 1997). Koudstaal *et al.* (1992) reafirman esta idea haciendo notar que no existe un solo y claro “problema” del agua, por lo que es difícil tanto centrar la atención del público en este recurso, como desarrollar un solo modelo centralizado para su manejo. Como consecuencia, se ha producido toda una serie de barreras que impiden su solución. Entre ellas destacan la inconsciencia en su uso, la mala interpretación de las necesidades y deseos de la gente, la falta de aceptación política de la mayoría de las acciones, los intereses encontrados

y la carencia de mecanismos adecuados para integrar la conservación del agua y el desarrollo económico (Reid, 1995).

A su vez, transitar hacia la sustentabilidad en el manejo del agua demanda la integración en múltiples niveles, por ejemplo, vegetación-suelo, social-natural, superficie-subsuelo, etcétera, así como el reconocimiento del sistema de valores en donde se enmarca el manejo, la conservación y, por lo tanto, la sustentabilidad. Es decir, los aspectos prácticos del *quién-qué* y el *porqué-dónde-cuándo-cómo*, sobre los cuales están basadas las estructuras de control, adaptación y cambio social (Romm, 1993). A su vez, estos aspectos hacen un llamado a la transdisciplina entre académicos, profesionales y partes interesadas. En palabras de Fry (2001), “esto dará la oportunidad de crear un entendimiento más ampliamente contextualizado del manejo de los recursos”, incluida el agua, y permitirá formular soluciones más creativas.

#### VISIONES/ESTRATEGIAS EN LA GESTIÓN DEL AGUA. ¿CÓMO SE HAN ABORDADO? FORTALEZAS Y DEBILIDADES

EL OBJETIVO principal en el manejo del agua ha sido asegurar su disponibilidad en suficiente cantidad, calidad y confiabilidad para el desarrollo y bienestar de una nación (Asmal, 1998). Sin embargo, el precario control que se tiene sobre los recursos hídricos ha ocasionado la modificación de los patrones de uso del agua, hasta llegar a la actual condición de “recurso escaso y amenazado” (Easter *et al.*, 1992; Gleick, 1998). Por ello, las reservas y los atributos del agua han cambiado notablemente como resultado del crecimiento de la población, del gasto que requiere la agricultura para irrigación, del desarrollo industrial y de los cambios en los estándares de vida que conlleva la urbanización.

Los estudiosos en la planeación del agua consideran que su gestión es un proceso continuo, el cual implica la toma de decisiones sobre diferentes opciones para el uso del recurso disponible con el fin de lograr metas específicas en un tiempo determinado (White, 1998; Jaspers, 2003). En el contexto histórico, sobre todo en el último siglo, se han aplicado al menos tres modelos de planeación

para su gestión: *a)* El orientado hacia la oferta, *b)* El orientado a la demanda, y *c)* El integrado/holístico (Falkenmark y Lundqvist, 1995; White, 1998; Al-Radif, 1999; McKinney *et al.*, 1999; Brandes *et al.*, 2005).

Cabe destacar que al analizar estos modelos, resalta la evolución en los objetivos de manejo. De esta manera, se presenta un cambio de los objetivos relacionados con el aseguramiento de la disponibilidad del agua para el desarrollo y bienestar de la región o la cuenca hidrológica, con la aplicación de intervenciones económicas y técnicas para regular la demanda y la satisfacción de la misma en forma integral y colaborativa en un horizonte de largo plazo. A continuación se describe cada uno de los modelos y se destacan sus principales características y limitaciones.

### *Modelo orientado a la oferta*

Se diseñó con el fin de satisfacer las necesidades básicas de salud y producción de alimentos (White, 1998). Las políticas se orientan tradicionalmente a gestionar el agua para que la gente disponga de ella con estos propósitos (Al-Radif, 1999). Desde este punto de vista, el problema principal se centra en la identificación de las necesidades de agua y en cómo hacerla asequible. Por lo general, estas necesidades se definen básicamente como el resultado del crecimiento poblacional y el desarrollo económico y agrícola, no como un asunto de política (Hoekstra, 2000). El postulado básico de este modelo, es considerar que los problemas de escasez del agua ocurren sólo en la medida en que no haya agua suficiente para satisfacer las demandas sociales y productivas, de tal forma, que sólo evalúa la disponibilidad de agua en términos cuantitativos y cualitativos (cuánta agua hay y de qué calidad).

De acuerdo con Brandes *et al.* (2005), el reto fundamental de este modelo es no aceptar límites, sino superarlos. Por ello, sus supuestos básicos son dos: 1) considerar al agua dulce como un recurso virtualmente ilimitado, por lo que el problema de la escasez se resuelve mediante el incremento de la infraestructura para suministrar el agua, y 2) que las demandas actuales de agua son insensibles a cambios en las políticas de manejo y a cambios

conductuales en los usuarios. Por todo ello, sus directrices y políticas están estrechamente relacionadas con asegurar suficientes cantidades de agua para satisfacer las demandas actuales y proyectadas. Además, esta orientación no se compromete totalmente con el impacto ambiental y económico que la construcción de infraestructura tiene en los servicios municipales o regionales ocupados del suministro de agua.

En términos financieros, este modelo se caracteriza por el subsidio que se utiliza para cubrir los costos generados por el suministro y tratamiento del agua, o bien los servicios son proporcionados sin costo para los usuarios. Lo mismo ocurre con los enormes costos derivados de los grandes proyectos hidráulicos centralizados a los que da lugar, como presas, sistemas de transferencia entre regiones hidrológicas, desviaciones de cauces, estaciones de bombeo y sistemas de distribución, los cuales, por lo general, impactan severamente las finanzas y los ecosistemas acuáticos regionales y locales (Brandes *et al.*, 2005).

En la actualidad, este modelo es severamente cuestionado, no sólo por los impactos negativos derivados de la construcción de infraestructura, sino por la sobreexplotación y el desperdicio del agua. También, porque se concentra más en cuestiones técnicas del suministro y menos en cómo se utiliza y se desecha el agua, por lo que siempre queda abierto a la espera de cantidades adicionales de agua para resolver el problema de la escasez (Easter *et al.*, 1992). La evaluación de estas limitaciones ha dado lugar a nuevos paradigmas, tal es el caso del basado en la demanda.

### *Modelo orientado a la demanda*

A partir de la década de 1990, el Banco Mundial recomendó reconsiderar el uso del modelo orientado a la oferta. Los detractores de este modelo, como Gleick (1998), Falkenmark y Lundqvist (1995) consideran necesario un cambio de paradigma en el manejo del agua, debido fundamentalmente a que la situación de escasez es de tal magnitud, que no es posible seguir considerando al agua como un recurso infinito. Por esta razón, recomiendan un modelo orien-



tado a la demanda, el cual fomenta un uso eficiente de su disponibilidad actual, más que el desarrollo de nuevas fuentes. La lógica detrás de este enfoque es que la disponibilidad es limitada y que la demanda no puede seguir sus tendencias actuales, por lo que las necesidades de agua deben satisfacerse con los recursos disponibles (Hoekstra, 2000).

A este modelo se le reconoce internacionalmente por ser clave en la modernización ecológica, y se caracteriza por introducir innovaciones en el manejo del agua que simultáneamente logra objetivos ecológicos y económicos. Su supuesto básico es mejorar la eficiencia en el manejo del agua, haciendo más de lo mismo pero con menos agua. Este supuesto básico es compartido con otros campos de manejo de recursos, tales como el de energía y transporte (Brandes *et al.*, 2005).

Desde este punto de vista, el uso del agua está sujeto a las necesidades y a los deseos de uso; las primeras no se pueden manipular porque están relacionadas con la satisfacción de los requerimientos básicos. Sin embargo, los segundos, como están en función de las costumbres y del comportamiento humano, se pueden manipular mediante la conciencia ambiental o la imposición tributaria (Serageldin, 1995).

En el contexto de los sistemas de distribución de agua en las zonas urbanas, implica toda medida o conjunto de medidas que reducen el gasto de agua, o bien que mejoran la eficiencia y el tiempo de uso. Broke y Peters (1988) definen a este modelo como “cualquier medida que reduce la extracción, en promedio o en sus picos, tanto de fuentes superficiales como profundas sin aumentar el grado de degradación del agua”. Sus principales estrategias se orientan principalmente a la asignación de precios reales al agua suministrada. También considera importantes a la educación para el ahorro, el desarrollo y adaptación de tecnologías eficientes para el uso del agua y el impulso de medidas para su reuso y reciclamiento (Brandes *et al.*, 2005).

Los defensores de este modelo consideran que, mediante mecanismos de mercado, se puede mejorar la distribución de

agua. Argumentan que esto ocurre cuando por cada unidad adicional de agua debe demandarse y utilizarse el máximo valor de retorno. En el Tercer Foro Mundial del Agua, en Tokio, en el 2003, se reconocieron los potenciales del modelo e incluso se promovió, con el afán de mejorar el desempeño de la industria del agua. En este foro, se reconoció la necesidad de valorar al agua como bien económico y por ende, asignarle un precio de modo que se recupere el costo de la provisión del servicio (Brandes *et al.*, 2005).

Sin embargo, a pesar de la aceptación internacional que tiene este modelo, hay retos enormes por vencer. La mayoría están relacionados con el cambio de percepción que la sociedad tiene sobre el valor real del agua y la necesidad de fomentar una actitud de responsabilidad hacia el recurso como un todo. Esta actitud de responsabilidad ha sido frenada por las políticas gubernamentales que promueven la idea del agua como un bien libre o como un producto técnico que puede comprarse y que fluye directo de la llave. Esta falta de transparencia en la información ha minimizado el interés y el conocimiento de la población sobre los asuntos del agua (German Advisory Council on Global Change, 1997).

A este modelo también se le critica por el fomento de estrategias reactivas y de carácter defensivo, en donde se pretende remediar y no prevenir. Aunque es importante resaltar, que si bien no es una panacea para dar solución al manejo del agua, puede ayudar a mitigar los costos del capital requerido para la expansión de la infraestructura y el control de los impactos ambientales derivados de las extracciones de agua y la descarga de aguas servidas.

### *Modelo orientado al manejo integrado y holístico*

En los últimos años, con la finalidad de superar las debilidades de los enfoques anteriores, se ha propuesto que el manejo y la planeación del agua se realicen de manera integrada y holística. La idea básica de esta propuesta es considerar al agua desde una perspectiva global, que integre las relaciones e interacciones dinámicas entre los sistemas natural y humano, los sistemas agua y tierra, y los grupos de interés clave (Keen, 2003).

Brandes *et al.* (2005) denominan a este modelo de “vía suave”, y es descrito como el resultado de la evolución de los programas de manejo del agua basado en la satisfacción de la demanda, que al volverse más complejos, de largo plazo e integrales, comenzaron a desarrollar un enfoque holístico en el manejo del agua. El objetivo de este modelo es lograr la sustentabilidad en el manejo del agua mediante el aumento de su productividad, más que encontrar nuevas fuentes. Además, pretende que se involucren los grupos de interés en la toma de decisiones y reconoce a los ecosistemas como legítimos usuarios del agua dulce (Wolff y Gleick, 2002; Brooks, 2003).

El manejo del agua difiere de los modelos convencionales en su concepto de demanda de agua, ya que con frecuencia el agua no se percibe como un producto final sino como el medio para completar una tarea, como podría ser el uso doméstico o la producción agrícola, de tal forma, que la demanda considerada en las proyecciones para el uso del agua no es el recurso en sí, sino los servicios que provee. Desde este punto de vista, el ejercicio de la planeación del manejo del agua, se debe orientar a proveer un servicio, en donde el objetivo es satisfacer las demandas por servicios del agua no el agua *per se*.

Un aspecto clave en la planeación integral del agua es el reconocimiento de que las necesidades existentes pueden ser satisfechas con menos cantidad de agua de la que se usa actualmente. Sus estrategias frecuentemente son las mismas del modelo basado en la satisfacción de la demanda, tales como tecnologías eficientes, educación a los usuarios, medidas de regulación en el uso y el empleo de instrumentos económicos para aumentar la productividad del agua disponible, buscando asegurar igualdad de oportunidades en su acceso (Brandes *et al.*, 2005).

En términos de organización, el modelo integral asume que los diferentes grupos de interés sobre el uso del agua necesitan comunicar sus perspectivas sobre el recurso, construir consensos sobre sus intereses básicos y mandatos, así como crear las capacidades para encarar los conflictos. Aunque la búsqueda de este tipo de enfoque no es nueva, ha sido extremadamente difícil

para las organizaciones involucradas en el manejo del agua lograr que sea integrado. Las principales dificultades surgen del amplio rango de opciones posibles a que da lugar, ya que es frecuentemente debilitado por los puntos de vista políticos asociados a las mismas (White, 1998). Sin embargo, a pesar de estas dificultades, se han emprendido importantes acciones internacionales para la adopción de este modelo, como son la creación en 1996 del Global Water Partnership (GWP) y el World Water Council.

#### ESTRATEGIAS INTEGRALES EN EL MODELO SUAVE:

##### MANEJO INTEGRAL DE CUENCAS.

##### ¿QUÉ IMPLICA? ¿CÓMO SE CONSTRUYE?

##### EL MODELO TRANSDISCIPLINARIO COMO ALTERNATIVA

EL MANEJO integral de cuencas-ecosistemas es una estrategia de planeación de la región-paisaje para lograr la sustentabilidad ambiental y el uso sustentable de recursos, incluida el agua. Se caracteriza por ser un modelo de planeación regional que busca integrar conocimientos ecológicos dentro de un esquema complejo de valores sociopolíticos, con la meta de lograr la protección de la integridad de los ecosistemas a largo plazo (Grumbine, 1994). Además, busca formas institucionales, administrativas y científicas para el manejo de cuencas-ecosistemas como unidad básica. Como proceso de planeación, es holístico, intertransdisciplinario, orientado a metas y de carácter colaborativo (Slocombe, 1993).

En un sentido amplio, es un proceso incluyente que busca manejar áreas a diferentes escalas de tal forma que los servicios ambientales y los recursos bióticos sean preservados, en tanto se mantengan usos humanos apropiados y una mejora en las condiciones de vida (Haeuber y Franklin, 1996). Los servicios ecológicos son procesos biológicos, físicos y químicos que ocurren en ecosistemas naturales y seminaturales que mantienen la habitabilidad del planeta. Los principales servicios son la distribución de energía, el mantenimiento de la fertilidad del suelo y la regulación del ciclo hidrológico (De-Groot, 2002). Los recursos bióticos, por otra parte, incluyen

a la variedad de genes, especies y comunidades ecológicas y los procesos que los mantienen (Wilson y Peter, 1998).

Desde el punto de vista de planeación estratégica, se orienta a los procesos, ya que no es una táctica de manejo hacia un fin, sino que busca proteger y restaurar la integridad ecológica regional, en tanto construye economías sustentables y estructuras efectivas de organización y de toma de decisiones. Además, en el largo plazo, es un proceso de entendimiento y toma de decisiones que requiere que se involucren múltiples fuentes de experiencia y de grupos de interés. Persigue también un cambio organizacional e incluye estrategias de restauración ecológica para recrear componentes de sistemas naturales críticos y procesos de regulación de largo plazo (Yafee *et al.*, 1996). También, se le considera un proceso de aprendizaje, pues postula que aprender de la experiencia puede ayudar a moverse hacia una sustentabilidad ambiental, y que para ello se requiere del conocimiento profundo tanto de la región como de las salidas derivadas de las estrategias de manejo.

Desde la perspectiva teórica, trata de lograr que el manejo de cuencas-ecosistemas sea una estrategia que se caracterice por ser holística, completa, integral y transdisciplinaria (Slocombe, 1998). Busca una visión integral de espacios geográficos grandes, tales como cuencas, biorregiones, regiones económicas o políticas, etcétera. En términos de la construcción de enfoques hacia la sustentabilidad, sostiene que el territorio es un todo, incluyendo sus componentes naturales y sociales, y que se requiere de acciones colaborativas para construir los procesos de toma de decisiones. Subraya la obtención de datos y el monitoreo, el trabajo con límites administrativos, el manejo adaptativo, la cooperación entre agencias, el cambio organizacional, y destaca el mantenimiento de la integridad ecológica (Slocombe, 1993; Grumbine, 1990, 1994).

El sentido práctico, esta estrategia concentra las escalas del paisaje del tamaño de ecosistemas, y la estructura y el funcionamiento de los mismos como el aspecto esencial. Como resultado, la restauración y el manejo de procesos ecológicos, tales como reciclamiento de nutrientes, regímenes de disturbio y flujos hidrológicos, se vuelven importantes para mantener la composición de

especies y de la diversidad. Aunque cabe aclarar que, si la abundancia depende de la diversidad ecológica, las especies dejan de ser el centro de atención y lo ceden a los ecosistemas. En este contexto, las metas relacionadas con integridad ecológica se orientan al mantenimiento de la diversidad de los ecosistemas. Asimismo, la búsqueda de usos humanos sustentables es su reto fundamental que requiere, por un lado, investigaciones que proporcionen información sobre los ecosistemas y sus componentes, así como de los factores sociales y económicos que los amenazan; por otro, tareas encaminadas a identificar y priorizar áreas naturales para su protección. La escuela de British Columbia, en Canadá, integra estos aspectos prácticos en tres dimensiones: evaluación, manejo y planeación, acción y educación. Los detalles pueden verse en el cuadro 1.

Desde el contexto de la transdisciplina, el carácter integral se deriva de que diferentes culturas con conocimientos diversos forman puentes, y sus conocimientos se funden cuando se responde a un interrogante de investigación o se persigue un propósito común. Los proyectos integrales se dan cuando el objetivo de la investigación o la meta a alcanzar se define de manera conjunta, y su respuesta se deriva de la integración del conocimiento disciplinario y el de los interesados que no dominan una disciplina. Las bondades que se derivan de este tipo de enfoque para la solución de problemas son: una mayor aceptación por parte de las partes interesadas, mayor participación del público, o una reducción de los conflictos entre diferentes intereses y metas (Tress y Tress y Fry, 2006).

En acuerdo con el GWP TAC (Ferreira y Botequilha, 2006) “la Gestión Integral del Recurso Agua (IWRM, por sus siglas en inglés) promueve un acercamiento holístico a los recursos acuáticos y a la integración a distintos niveles. También destaca la necesidad de la transdisciplina, es decir, de cruzar las fronteras disciplinares con el propósito fundamental de crear conocimientos integrados de la realidad alrededor de un propósito común” (Thompson, 2000).

# CUADRO 1 CRITERIOS Y ATRIBUTOS PARA ESTRUCTURAR UN MANEJO INTEGRAL DE CUENCAS

1. Evaluación de cuencas	2. Manejo y planeación de cuencas	3. Acción y educación
1.1 Evaluación de los impactos de la urbanización	2.1 Diseño de planes para el manejo de cuencas	3.1 Diseño de estrategias para la protección ambiental y educación pública
1.2 Aplicación de procedimientos para el monitoreo de cuencas	2.2 Diseño de aspectos políticos, legales e institucionales	3.2 Diseño de sitios urbanos
1.3 Evaluación de la hidrología	2.3 Diseño de consideraciones económicas y financieras	3.3 Propuestas de desarrollo del uso del suelo
1.4 Monitoreo y evaluación de las características de los arroyos y procesos de sedimentación	2.4 Diseño de prácticas para el manejo de picos de tormenta	3.4 Mecanismos para el control de la erosión y sedimentos
1.5 Monitoreo y evaluación de las fuentes y cargas de la contaminación	2.5 Planificación del uso del suelo y de la conservación	3.5 Restauración de la cuenca
1.6 Monitoreo y evaluación de la calidad del agua y de los sedimentos		
1.7 Monitoreo y evaluación del hábitat y biota acuáticos		
1.8 Diseño de la base cartográfica de la cuenca aplicando Sistemas de Información Geográfica		
1.9 Modelado de la cuenca		

Fuente: Elaboración propia.

De manera más precisa, en el ámbito de la investigación, se habla de adoptar un enfoque transdisciplinario cuando:

- Los temas de investigación coinciden en varias disciplinas y tienen el propósito de desarrollar un marco conceptual inclusivo de conocimientos (Lattucca, 2001).
- El conocimiento que se busca está determinado por cuatro componentes: 1) temas de investigación inspirados por problemas de naturaleza compleja, difícil y de gran escala; 2) temas de estudio determinados por la coincidencia de múltiples disciplinas; 3) instrumentos de observación creados por el uso sistemático de diversos métodos provenientes de distintas disciplinas; y 4) una solución mayor a la suma de sus partes (Young, 2000).
- Cuando se da mayor importancia a la demanda de producción de conocimiento –más que del lado de la oferta– y mayor atención a su relevancia social y política (investigación orientada a problemas) (Van-de-Kerkhol y Leroy, 2000).
- Se parte de un proceso social orientado a: 1) hacer explícitos y negociables valores y normas en la sociedad y en la ciencia, 2) a atribuir significado al conocimiento que proviene de la ciencia para resolver problemas sociales (Hirsch *et al.*, 2006).

Desde este punto de vista, las cuencas y los acuíferos pueden considerarse paisajes y pueden actuar como una unidad de manejo apropiado desde la perspectiva holística. En este sentido, uno de los principales aspectos a atender es la integración del agua en el contexto del paisaje: el agua subterránea y superficial en el contexto del ciclo hidrológico y la sinergia suelo-agua.

Dentro de las ventajas que la visión región-paisaje de la planeación en el manejo del agua puede proporcionar se pueden citar las siguientes: primero, un mejor entendimiento de los fenómenos ecológicos relacionados con el manejo del agua, por ejemplo, la configuración espacial de los usos de suelo y de los ecosistemas, los



cuales a su vez influyen sobre las variables y fenómenos hidrológicos tanto en términos de su calidad como en cantidad; segundo, puede proporcionar un método para planear y manejar el recurso agua en el contexto de la región-paisaje.

Son distintas las cuestiones de investigación relacionadas con el agua que se podrían responder desde una perspectiva de planeación que tome en cuenta la región-paisaje (Ferreira y Botelho, 2006): ¿cómo influye la estructura del paisaje en la calidad y cantidad del agua superficial y subterránea?, ¿qué áreas del paisaje son esenciales para mantener o restaurar los sistemas de agua superficial y subterránea?, ¿cómo pueden conservarse estas áreas en un contexto socioeconómico sustentable? Las respuestas a estas preguntas implicarían modelos hidrológicos espacialmente explícitos que describan los flujos de agua y su calidad. El paisaje se analizaría para encontrar relaciones espaciales y no espaciales entre la estructura del paisaje, las actividades y prácticas humanas asociadas, y la cantidad y calidad del agua superficial y subterránea. Por ejemplo, ¿qué prácticas y uso de suelo están relacionadas con contaminación de las fuentes de agua superficial y subterránea y la sobreexplotación?, ¿su ubicación en el paisaje influye en sus impactos sobre los cuerpos de agua? Se podrían utilizar herramientas estadísticas sobre las respuestas de los modelos hidrológicos y las métricas del paisaje para determinar estas relaciones y su significado. También se podrían construir escenarios alternativos sobre los cuales se podrían evaluar diferentes soluciones de planeación. Con base en estas relaciones se podrían definir criterios para delimitar las áreas de protección de acuíferos y las prácticas de manejo que guiaran la actividad humana en estas áreas. Esto buscaría garantizar la preservación de procesos esenciales para el manejo sustentable de los cuerpos de agua. A esta perspectiva ecológica se podría incorporar la de las ciencias sociales para responder a las siguientes preguntas: ¿cómo participan los humanos en la ecología del paisaje?, ¿cómo pueden mantenerse los paisajes culturales, que a su vez dependen de la perturbación humana relacionada con usos históricos?

En este punto cabría preguntarse, ¿cómo puede construirse un enfoque transdisciplinario para resolver la problemática del agua en México y en otros lugares? La respuesta podría centrarse en cinco puntos:

- Dando prioridad a la solución de problemas ambientales o sociales antes que a un problema meramente científico (Van-de-Kerkhol y Leroy, 2000). Aquí la solución de problemas se refiere a mejorar el entendimiento de la problemática y comprometerse en la investigación y desarrollo relacionados con, ¿por qué? y ¿cómo? Tanto las instituciones como las prácticas sociales deben cambiarse. En este sentido, el enfoque transdisciplinario está orientado a abordar las distintas dimensiones de la problemática e investigar su complejidad, dinámica y variabilidad con respecto a cómo puede transformarse esa problemática de una manera más sustentable y buscar estrategias que satisfagan las necesidades de todas las partes interesadas, incluidas las de los ecosistemas.
- Integrando en sus estudios profesores-investigadores de diferentes disciplinas con participantes no académicos para crear nuevo conocimiento e investigar una meta común (Tress y Tress, 2005).
- Realizando una estrategia adaptativa de manejo de recursos como medio para contender contra la incertidumbre asociada a los problemas del mundo real (Healey, 1998).
- Llevando a cabo la comunicación e intercambio de información con las partes interesadas, los elaboradores de políticas y los usuarios finales (Kinzig, 2001).
- Asimismo, promoviendo que los productos de este enfoque, tales como herramientas y estrategias concretas, sean usados por los mismos sujetos (Tress y Tress, 2005).

UNA EXPERIENCIA EN EL CONTEXTO METROPOLITANO:  
VIABILIDAD DEL CANAL NACIONAL EN EL  
DISTRITO FEDERAL PARA PODER SER PLANEADO  
COMO UN CORREDOR VERDE

*Introducción*

Tradicionalmente, las áreas verdes asociadas a escurrimientos temporales o permanentes han tenido poca relevancia en los planes urbanos, ya que la población y el gobierno en general sólo las consideran como zonas recreativas y de esparcimiento. Sin embargo, el actual reconocimiento mundial de los servicios ambientales que proporcionan a las ciudades ha sido un detonador para que estas áreas empiecen a adquirir relevancia dentro de la agenda política mundial, no sólo desde la perspectiva ecológica sino también social y económica. Esta visión moderna ve en un futuro cercano la demanda de mayores espacios para la recreación en contacto con la naturaleza dentro de la ciudad, debido a un cambio de actitud hacia la naturaleza misma y a la búsqueda de estilos de vida que conduzcan a la sustentabilidad urbana. En consecuencia, se ha creado la oportunidad para introducir estos espacios como elementos clave de la planeación de las ciudades, con el fin de incrementar el bienestar de sus habitantes.

En este contexto, el estudio se enfocó a determinar la viabilidad para planear el Canal Nacional como un *corredor verde* de tercera generación. Para la evaluación de la viabilidad se empleó la metodología de planeación del paisaje desarrollada por Botequilha y Ahern (2002), en sus tres primeras fases: enfoque, análisis y diagnóstico. Como métodos auxiliares se emplearon el análisis A'WOT (Kajanus *et al.*, 2004), encuestas semiestructuradas aplicadas a las principales partes interesadas (Arksey y Knight, 1999), y el análisis de contenido del discurso (Descombe, 1999).

Los resultados de este estudio confirman que el Canal Nacional tiene potencial para la conservación de hábitats acuáticos y su diversidad biológica, para albergar actividades recreativas en contacto con la naturaleza, para conectar elementos culturales de la región y para fomentar actividades de educación e investigación ambiental.

### *Los corredores verdes en la planeación urbana*

En la práctica, la estrategia que ha predominado en la planeación de este tipo de espacios es la de la exclusión. Es decir, son parches o lunares verdes aislados dentro de una estructura urbana en expansión. Esta estrategia tiene las desventajas de no permitir el libre tránsito de la fauna y flora local y de confinar la oferta recreativa a espacios cerrados o delimitados. Por ello ha surgido una corriente de opinión internacional en el ámbito de la planeación del territorio, que apoya la búsqueda de nuevas alternativas para romper su aislamiento. Una de ellas son los llamados *corredores verdes*, los cuales son una estrategia de planeación urbana basada en la interconexión de los elementos verdes sobresalientes del paisaje urbano y en el uso múltiple del espacio. Sus bondades incluyen la capacidad para mitigar la pérdida del paisaje natural o su fragmentación, y la de adaptarse a las presiones físicas y psicológicas de la urbanización. Como alternativa de planeación del territorio, dan lugar a una contracorriente en el uso del suelo para balancear los paisajes dominados por los humanos. Desde esta premisa, el contar con corredores verdes dentro de una ciudad permitiría fomentar la valoración de las áreas verdes y los cauces abiertos de ríos tanto en la planeación urbana como en la apreciación por parte del público en general. Esto coincide con la visión actual de los especialistas en planeación, quienes sostienen que, en tanto no se acepte que estos espacios pueden tener múltiples valores de uso, no podrán protegerse de las actividades humanas destructivas.

*Tipos de corredores verdes*

Hay diferentes tipos de *corredores verdes*. Los denominados de primera generación, aunque en realidad nunca han sido reconocidos como tales, están constituidos por los principales ejes viales de una ciudad que albergan algún tipo de vegetación. Son las avenidas y bulevares especiales, sobresalientes y atractivos, como el Paseo de la Reforma o la Avenida de Los Insurgentes, en la Ciudad de México, o los bulevares de los Campos Elíseos, en París, y el Koltso, en Moscú. Estos ejes urbanos tienen como mínimo tres funciones: movimiento, uso y experiencias visuales importantes. Por lo general, estos ejes son un elemento de conexión de puntos clave del paisaje urbano y de distintos puntos de destino en la urbe. La experiencia de pasear en estos ejes es tan importante como sus funciones de movimiento y uso.

La segunda generación de este tipo de corredores está orientada al diseño de espacios verdes apropiados para el desplazamiento no motorizado, esencialmente enfocado a la recreación. El propósito fundamental en su diseño es el de proporcionar espacios para el desplazamiento y recreación de aquellos que huyen del ruido y la contaminación. De ahí que en su diseño se les dé prioridad a las necesidades de peatones y ciclistas. Los corredores de la segunda generación son una evolución de los primeros y se enfocan a tratar de reintroducir a la naturaleza dentro de la ciudad. Ejemplos de ellos son las riberas de los ríos, canales y arroyos dentro de la urbe. Sin embargo, en muchas ciudades se han aprovechado como corredores verdes las áreas que se ubican a lo largo del tendido de líneas eléctricas o tuberías de gas o agua.

A diferencia de los dos primeros tipos de corredores verdes, los de tercera generación se caracterizan por buscar el logro simultáneo de múltiples objetivos que buscan cubrir no sólo las necesidades humanas sino también las de la vida silvestre. Esta generación de corredores sigue la tradición de aquellas que la precedieron, de mitigar los efectos de la sobrepoblación y de las “enfermedades” de la urbanización. Pero además, se busca que respondan a las nece-

sidades de protección del hábitat de especies de la vida silvestre, que contribuyan al control del flujo de agua durante precipitaciones intensas, así como a mejorar la calidad del agua, que fomenten la preservación histórica, que brinden oportunidades para la educación y la interpretación en contacto con la naturaleza, y que doten de belleza escénica al paisaje urbano.

### *La investigación: materiales y métodos*

El diagnóstico ambiental se llevó a cabo en el tramo del Canal Nacional comprendido entre calzada de la Virgen y el Mercado de Flores de Cuemanco y su área de influencia (figura 2). Esta aproximación constituye la primera de las etapas en las que se pretende abordar todo el canal, desde un punto de vista incremental de planeación.

Los objetivos y el ambiente operativo son los elementos principales de la toma de decisiones estratégica sobre cualquier empresa (Kajanus *et al.*, 2004). Por esta razón, para poder responder a la pregunta, ¿es posible que el Canal Nacional se pueda planear como un corredor verde?, se hizo un análisis de viabilidad en función del potencial del sitio para lograr una imagen objetivo, y del ambiente operativo para poder poner en práctica esta imagen deseada.

El proceso metodológico que se empleó tomó como marco general de referencia el modelo de planeación regional con vías hacia la sustentabilidad propuesto por Botequilha y Ahern (2002), que consta de cinco fases: enfoque, análisis, diagnóstico, pronóstico y síntesis; de éstas, sólo se emplearon en este trabajo las cuatro primeras.

Siguiendo el proceso de planeación, la fase de *enfoque* tuvo el propósito de definir la imagen objetivo del Canal Nacional, visto como un corredor verde de tercera generación (figura 3). En esta fase se definieron también los criterios para elaborar un diagnóstico del potencial del sitio para cumplir con esta imagen, es decir, calidad del hábitat terrestre, calidad del hábitat acuático y potencial para la recreación.

## LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



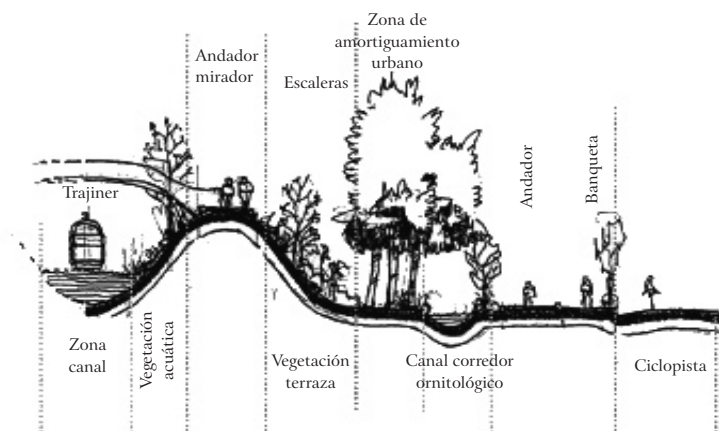
— Delimitación del Canal Nacional

— Área de influencia de la UAM-X

Fuente: Cortesía del Programa de Estudios Metropolitanos, UAM-X.

Desde el punto de vista del ambiente de operación, esta fase se abocó a la identificación de los grupos de interés, en este caso siete, los cuales incluyeron a los usuarios del espacio, los habitantes del área de influencia, los directores de escuelas de nivel básico en esta área, los alumnos y académicos de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco (UAM-x), las autoridades de la UAM-x, las autoridades delegacionales y a las autoridades del DF. El número de entrevistados en cada grupo se muestra en el cuadro 2. Una vez identificados los grupos de interés, se definieron los temas que guiarían las entrevistas con cada uno de estos grupos

FIGURA 2  
CORTE VERTICAL DE UN CORREDOR VERDE



Fuente: Cortesía del Programa de Estudios Metropolitanos UAM-X.

y la forma de abordarlos. Las entrevistas tuvieron el propósito de obtener información sobre el interés en el proyecto y la disposición a colaborar de cada uno de estos grupos para poder llevar a cabo el proyecto.

La fase de *análisis* abordó la construcción y validación de las herramientas para la obtención de información, en este caso, una lista de chequeo para el diagnóstico ambiental del sitio, las entrevistas semiestructuradas, y una hoja de síntesis de información ambiental. También comprendió la aplicación de los instrumentos de investigación y obtención de datos, un análisis manual de contenido de las respuestas de las entrevistas y la creación de la base de datos que sirvió de base para el diagnóstico.

Sintetizando la información anterior, la fase de *diagnóstico* buscó responder a las preguntas: ¿qué tan bien se encuentra ahora el sistema?, y ¿cuáles son las oportunidades y amenazas a las que se enfrentará? para poder convertirse en un corredor verde de tercera generación. Para responderlas, se aplicó un análisis FODA (SWOT en inglés) a la base de datos ambientales y a la información surgida



CUADRO 2  
NÚMERO DE ENTREVISTADOS CORRESPONDIENTE  
A CADA GRUPO DE INTERÉS

<i>Grupo de interés</i>	<i>Número de entrevistados</i>
Usuarios del Canal Nacional (corredores y personas que realizan con frecuencia alguna actividad dentro del sitio)	30
Habitantes del área de influencia	120
Autoridades de las escuelas de nivel básico	6
Estudiantes de la UAM-X	120
Investigadores de la UAM-X	8
Autoridades de la UAM-X	3
Autoridades gubernamentales	4

Fuente: Elaboración propia.

del análisis del discurso de las entrevistas. Con ello se identificaron los grupos de Fortalezas (F), Oportunidades (O), Debilidades (D) y Amenazas (A), tanto del sitio como del ambiente operativo para alcanzar la imagen objetivo. Posteriormente, se ponderaron tanto los cuatro grupos anteriores como los factores incluidos en ellos, con lo cual se identificó, de manera cuantitativa, su importancia relativa, los factores determinantes de la viabilidad y el tipo de estrategia que debe ser promovida para facilitar la planeación. Cabe mencionar que Kajanus *et al.* (2004) establecen este híbrido entre al Análisis FODA y la ponderación, como el método A'WOT.

Finalmente, como complemento al análisis de viabilidad, en la fase de *prognosis* se propuso una serie de acciones prioritarias para poder llevar a efecto el plan.

### *Resultados*

El diagnóstico ambiental y recreativo sobre un tramo del Canal Nacional arroja resultados contrastantes. Aunque, en términos generales, se tienen potencialidades para la recreación a lo largo de las riberas del canal, algunas partes del tramo muestran impactos que requieren de acciones inmediatas de restauración.

Para el fragmento que va de La Virgen a Calzada del Hueso, se tiene que los bordes del canal son calificados como un sitio de buena calidad ambiental. Esta zona es la que menor perturbación presenta en su vegetación ribereña. En ella hay una mayor diversidad de especies vegetales y mejor calidad de los individuos. Sin embargo, hay poca diversidad de flora nativa, ya que predominan los eucaliptos y hay pocos ahuejotes y ahuehuetes. A pesar de ello, la vegetación ofrece un hábitat que favorece el establecimiento de comunidades ornitológicas, por lo que aquí se localizó la mayor abundancia y diversidad de aves. No ocurre lo mismo con el hábitat acuático, en donde su condición se califica como en condiciones regulares, ya que está afectado principalmente por la extensa cobertura del lirio acuático. Su presencia se explica por las condiciones de eutrofización del agua del canal.

Desde la perspectiva de la recreación, cuenta con grandes potencialidades para realizar actividades recreativas, a pesar de no contar con una infraestructura de espacios verdes o recreativa. Actualmente, sólo se pueden realizar actividades por un sendero a lo largo del canal, el cual requiere de mantenimiento.

La Ciénega Grande, en cambio, es un área con una condición regular porque hay pocos árboles, pero es importante como refugio para especies de aves rapaces y acuáticas migratorias y residentes; además, el lugar está relativamente limpio de basura. La Ciénega Grande tiene un potencial recreativo importante derivado de las bellezas paisajísticas que pueden observarse desde ahí y de la buena cantidad de fauna silvestre que se localiza en ella. Sin embargo, las actividades de esparcimiento en contacto con la naturaleza se dificultan porque no cuenta con senderos ni luminarias.

El fragmento de La Virgen a Santa Ana es el más perturbado desde la perspectiva ambiental. Es la zona con mayor impacto humano, caracterizado por el mayor número de especies introducidas, una gran cantidad de basura, cascajo y animales muertos. Además, el canal está cubierto por vegetación terrestre, un indicador del grado de desecación del mismo. Su actual potencial recreativo es nulo, en tanto no sea restaurada su calidad ambiental.

Las recomendaciones se dan dentro de diferentes acciones para restaurar el Canal Nacional en este tramo. Primeramente, se observa la necesidad de realizar acciones encaminadas a una limpieza general para eliminar el cascajo, los residuos sólidos y el lirio del cauce. En segundo lugar, hay que instrumentar un programa permanente de control del crecimiento del lirio y la proporción de suficiente agua tratada para mantener el hábitat acuático dentro del cauce. Un tercer programa tiene que afrontar las necesidades de realizar cortes de limpieza y saneamiento de la vegetación ribereña a fin de eliminar puntos ciegos a lo largo de los senderos. Para ello, se propone disminuir el número de especies exóticas, principalmente eucaliptos e higuerillas, y hacer una sustitución por ahuehuetes y ahuejotes y mantener un control fitosanitario. Hay que instaurar un cuarto programa de educación ambiental encaminado al disfrute del contacto con la naturaleza y la protección de la flora y fauna del canal, que ya cuenta con una riqueza de fauna, en especial de aves, digna de ser conservada y protegida.

Desde la perspectiva de la recreación, se propone un quinto programa que aumente y mejore la infraestructura. Para ello, se sugiere dar mantenimiento a las luminarias y poner otras en donde no hay, hacer lo mismo con los senderos y construir nuevos en donde hacen falta, acondicionar sitios de descanso y construir puentes que comuniquen ambas riberas. También es necesario mejorar las condiciones de seguridad y aumentar los rondines de vigilancia para evitar actos vandálicos.

Finalmente, se propone el diseño de un programa de monitoreo que constate periódicamente la calidad ambiental y recreativa del Canal Nacional.

El diagnóstico del ambiente operativo. Los principales puntos a destacar en el análisis A'WOT fueron aspectos relacionados con la voluntad de los distintos grupos de interés para participar en su rescate, el estado de la infraestructura recreativa, el financiamiento y organización necesarios para su rescate, el valor multidimensional del sitio y las condiciones actuales de uso y seguridad.

En este sentido, los resultados del análisis A'WOT (cuadro 3) muestran primero que el rescate del Canal Nacional tiene buenas

oportunidades de poder llevarse a cabo, sobre todo desde el punto de vista político y social, en virtud de la voluntad que estos dos sectores mostraron para participar en su rescate, cada uno desde su ámbito. Esta situación crea la oportunidad de estructurar una propuesta con la integración de múltiples grupos de interés y de contar con poder de acción mediante recursos tanto humanos como financieros.

Con respecto a las debilidades, la falta de mantenimiento e infraestructura resaltan como las más importantes. Esto podría explicarse por la influencia que las percepciones de las personas ejercen sobre la valoración de un sitio. Si la gente percibe un espacio como deteriorado, sucio o incompleto, éste no cumple con sus expectativas y tiende a ignorarlo, abandonarlo o hacer un mal uso de él. Asimismo, si no se detecta organización detrás de un proyecto, se podría interpretar como una iniciativa poco seria y con poca probabilidad de llevarse a cabo, lo cual puede limitar el nivel de compromiso de los actores con la empresa. De ahí la inquietud ante la falta de un plan maestro que dé fe de la formalidad y guíe la propuesta.

Desde la perspectiva de las fortalezas, el Canal Nacional reúne dos aspectos clave. Primero, el valor ecológico, recreativo, histórico y cultural que presenta el sitio, ya que es la materia prima sin la cual el concepto de corredor verde multifuncional pierde sentido. Este valor se encuentra apoyado por la presencia de fauna y flora nativa, así como de bellezas paisajísticas. Asimismo, por la conectividad entre sitios de relevancia histórica y cultural, como lo son El Centro Nacional de las Artes, la iglesia de Mexicaltzingo, el ex convento de San Francisco Culhuacán y el mercado de las Flores de Xochimilco, donde pueden encontrarse manifestaciones culinarias típicas. Segundo, el valor actual de uso que posee, ya que muchos habitantes de las zonas aledañas lo utilizan para realizar actividades deportivas o de esparcimiento en contacto con la naturaleza. Además de que la demanda actual y potencial de este tipo de usuarios justifica plenamente la idea de querer rescatar este espacio público, también abre la posibilidad de contar con

su apoyo para realizar actividades de rescate y para ejercer presión social sobre las autoridades gubernamentales para la mejora y mantenimiento del sitio.

El balance de los resultados del análisis A'WOT sugiere que el proyecto de planear el Canal Nacional como un corredor verde de tercera generación es viable en buena medida. Esto lo comprueba el hecho de que tanto las fortalezas como las oportunidades representan 54% del grupo de factores, en contraste con las debilidades y amenazas que, en conjunto, suman 46%. Estos números nos podrían llevar de entrada a formular una estrategia que tome ventaja de las oportunidades y capitalice las fortalezas. Sin embargo, la moderada diferencia entre estos conjuntos de factores nos alerta sobre la necesidad de atender con la misma fuerza las debilidades y amenazas si se quiere lograr el éxito. Esto cobra relevancia en el caso del Canal Nacional, pues las principales amenazas y fortalezas están ligadas. Si continúa las malas prácticas de uso del canal, el capital ambiental del sitio se verá todavía más afectado y perderá su actual valor ecológico. Asimismo, si no se atiende la inseguridad, las personas que hacen uso deportivo y recreativo del sitio tarde o temprano lo abandonarían. Luego entonces, este sitio sería blanco fácil para otro tipo de iniciativas, como los asentamientos irregulares, el entubamiento del canal o el desarrollo inmobiliario, las cuales nos privarían de la oportunidad de contar con espacios de encuentro en un ambiente sano.

Las recomendaciones dentro de este contexto se enumeran a continuación:

1. Fomentar el interés por el rescate del Canal Nacional mediante campañas de difusión.
2. Fomentar la participación de la UAM-X como coordinadora del proyecto.
3. Buscar la sinergia entre las distintas agencias gubernamentales con injerencia sobre el espacio.
4. Concertar acuerdos con las comunidades aledañas y con las delegaciones para lograr el mantenimiento constante del sitio.

### *Conclusiones del caso de estudio*

De acuerdo con los resultados obtenidos, la propuesta de planear el Canal Nacional como un *corredor verde* es viable de manera general. Sin embargo, es importante que la planeación del proyecto se haga de manera incremental y adaptada a los diferentes tramos del canal, pues cada uno tiene su propio contexto de decisión.

Los tramos comprendidos entre Calzada de la Virgen y Ciénega Grande se perfilan como clave en la recuperación del Canal Nacional. Se considera que uno de los principales factores en este tipo de proyectos es su continuidad a largo plazo, y uno de los actores clave para lograrlo es la población. Por esta razón, será necesario involucrarla de manera activa y continua en el proyecto, a fin de que pueda apropiarse de él.

La planeación de corredores verdes con el objeto de transitar hacia un desarrollo urbano sustentable necesita contender contra la demanda de espacios públicos para la recreación y la necesidad de proteger las áreas verdes. El éxito de poner en práctica un corredor verde requiere de la creación de asociaciones entre las distintas partes interesadas, puesto que sus opiniones y los recursos limitados pueden impedir la intervención o limitar su alcance.

Para el campo de la planeación en general, promover la asociación entre gobierno, sector público y privado, e incorporar a los usuarios para la conservación de las áreas verdes y cauces a cielo abierto de ríos es uno de los mayores retos de las próximas décadas. Por medio de la construcción exitosa de estas relaciones, los planeadores pueden desarrollar estrategias innovadoras para conservar y crear infraestructura verde urbana.

Desde una perspectiva global, la justificación de intervenir en la revitalización del Canal Nacional, siguiendo la estrategia de corredores verdes, sería “lograr convertirlo en un modelo de integración urbana, recuperación ambiental y articulación social, que nos lleve a recuperar un espacio público propiciador del encuentro, la convivencia y el disfrute” (Guillermo Nagano, comentario personal).

## CONCLUSIONES GENERALES

EL ENFOQUE de manejo integral de cuencas se perfila como un esquema apropiado para abordar las problemáticas complejas derivadas de la planeación regional, incluyendo el manejo del agua. Esta perspectiva permite la integración de la sustentabilidad como un prerequisite, promueve perspectivas multidimensionales sobre el manejo del agua y da lugar a propuestas estratégicas de investigación y planeación regional anticipatorias y flexibles.

En términos teóricos, cabe destacar su papel en el fomento de enfoques sistémicos y transdisciplinarios de las regiones-paisaje. En aspectos prácticos, destacan sus propuestas de incluir a múltiples grupos de interés al ecosistema como una parte interesada y afectada por las decisiones sobre el agua, y la construcción de propuestas basadas en una planeación anticipativa y flexible.

Desde la perspectiva institucional, es decir, como institución de educación superior, este enfoque crea retos a la comunidad universitaria respecto al diseño de soluciones creativas para atender problemas relacionados con el equilibrio entre conservación de la naturaleza y desarrollo económico, tales como la sustentabilidad en el uso del agua. Otro reto es el desarrollo de metodologías que faciliten puntos de vista holístico y sistémicos sobre la problemática de la escasez de agua dulce y su construcción intertransdisciplinaria. En este último punto, la cooperación interpersonal e interagencias se identifica como factores clave para el éxito de este tipo de iniciativas.

No obstante las bondades de los enfoques integrales de manejo, es necesario aclarar que para que un enfoque transdisciplinario sea exitoso, se requiere de un campo de acción fértil que incluya tanto capital social (motivación y voluntad de la comunidad para participar, colaboración y compromiso del investigador en su papel como facilitador, etcétera) como político (liderazgo, voluntad política de las autoridades para renunciar un poco al poder, recursos comprometidos, etcétera) e intelectual. Asimismo, es necesario estar consciente de que este tipo de enfoques no serán factibles sin voluntad política y con la prevalencia de intereses personales sobre el compro-

CUADRO 3

ANÁLISIS A'WOT DEL CASO DE ESTUDIO CANAL NACIONAL  
Y LAS PRIORIDADES DE LOS FACTORES Y GRUPOS

(los factores más importantes del FODA en cada grupo están en cursivas)

<i>Importancia del grupo</i>	<i>Factores más importantes</i>	<i>Importancia del factor</i>
0.21	<i>Valor costosos tierras y cultura del sitio.</i>	0.090
	<i>Hay alguna infraestructura para realizar actividades deportivas.</i>	0.020
	<i>Hay algunos proyectos delegacionales y un proyecto de la VUMI en el área de este sitio.</i>	0.040
	<i>Preservación de las tierras para las actividades.</i>	0.060
0.33	<i>Disponibilidad de los recursos humanos y culturales de la VUMI en las tierras de reserva del Canal Nacional.</i>	0.105
	<i>Disponibilidad de las autoridades delegacionales a participar y a priorizar el desarrollo del Canal Nacional.</i>	0.059
	<i>Hay oportunidades de financiamiento para proyectos del desarrollo del Canal Nacional.</i>	0.049
	<i>La cercanía de la VUMI permite que ésta participe de forma activa y permanente en la restauración del sitio.</i>	0.046
	<i>La cercanía del Canal Nacional a la VUMI representa una ventaja para realizar actividades de investigación y de docencia.</i>	0.036
	<i>El Canal Nacional posee los elementos necesarios para realizar actividades de educación ambiental.</i>	0.010
	<i>La vegetación acústica puede tener uso artesanal.</i>	0.008
	<i>Las características del Canal Nacional permiten la reforestación.</i>	0.006



	Hay disposición de las escuelas aledañas para realizar tareas de rescate del Canal Nacional.	0.006
	La mayoría de los habitantes aledaños al Canal Nacional están dispuestos a usarlo siempre y cuando se mejore.	0.008
	El Canal Nacional tiene potencialidades para ser un espacio de interés turístico y recreativo.	0.008
	La naturaleza del proyecto permite que sea de carácter interdisciplinario.	0.008
0.29	<i>Falta de mantenimiento al sitio.</i>	0.090
	<i>Falta de infraestructura para realizar actividades deportivas y recreativas.</i>	0.040
	<i>Falta de plan maestro.</i>	0.030
	<i>Falta de demanda social.</i>	0.030
	<i>Se vierte agua residual en los canales.</i>	0.030
	<i>Falta de seguridad.</i>	0.020
	<i>Existe una banda que limita el acceso al sitio.</i>	0.020
	<i>Falta de financiamiento.</i>	0.010
	<i>Falta de difusión.</i>	0.010
	<i>Actividad de pastoreo dentro del sitio.</i>	0.010
0.17	<i>La inseguridad.</i>	0.040
	<i>La iniciativa para el embalsamiento del Canal Nacional.</i>	0.010
	<i>La falta de educación ambiental en algunos de los grupos de interés.</i>	0.020
	<i>Se percibe como un foco de infección.</i>	0.010
	<i>El riesgo por presencia de árboles.</i>	0.010
	<i>Los perros que actúan sobre el río del canal.</i>	0.032
	<i>El crecimiento urbano.</i>	0.010
	<i>Falta de apropiación del proyecto.</i>	0.032

miso social que implica planear y manejar una región-paisaje. De aquí la importancia de que cualquier investigación que intente emplear un enfoque transdisciplinario en el proceso de planeación y manejo incluya una evaluación de la visión intersubjetiva de las partes interesadas con el fin de identificar las fuerzas conductoras que pueden ya sea promover o entorpecer dicho proceso.

## BIBLIOGRAFÍA

- AL-RADIF, A. (1999), "Integrated Water Resource Management (IWRM): An approach to face the challenges of the next century and to avert future crises", *Desalinization*, vol. 124, Ámsterdam, Elsevier, pp. 124-153.
- ARKSEY, H. y P. Knight (1999), *Interviewing for social scientists*, Londres, SAGE.
- ASMAL, K. (1998), "Water as a metaphor for governance: issues in the management of water resources in Africa", *Water Policy*, núm. 1, vol. 6, Londres, IWA Publishing, pp. 95-101.
- BOTEQUILHA, A. y J. Ahern (2002), "Applying landscape concepts and metrics in sustainable landscape planning", *Landscape and Urban Planning*, núm. 59, Ámsterdam, Países Bajos, pp. 65-93.
- BRANDES, O.M., K. Ferguson, M. M'Gonigle y C. Sandborn (2005), *At a watershed: ecological governance and sustainable water management in Canada*, The POLIS Project on Ecological Governance, Canadá, Universidad de Victoria, 120 pp.
- BROOKS, D.B. (2003), "Against the flow", *Alternatives*, núm. 29, vol. 2, pp. 29-33.
- BROKE, D. y R. Peters (1988), *Water: the potential for demand management in Canada*, Ottawa, Science Council of Canada, 198 pp.
- CHRISTENSEN, N.L., A.M. Bartuska, J.M. Brown, S. Carpenter, C. D'Antonio, R. Francis, J.F. Franklin, J.A. MacMahon, R.F. Noss, D.J. Parsons, C.H. Peterson, M.G. Turner y R.G. Woodmansee (1996), "The Report of the Ecological Society of America Committee on the Scientific Basis of Management", *Ecological Applications*, núm. 6, vol. 3, EU, Ecological Society of America, pp. 665-691.
- COSTANZA, R. (1997), *Frontiers in ecological economics: trans-disciplinary essays*, Cheltenham, Edward Elgar, 205 pp.
- DE-GROOT, R.S., M.A. Wilson y R.M.J. Bouman (2002), "A Typology of the Classification, Description and Valuation of Ecosystem Functions,

- Goods and Services”, *Ecological Economics*, núm. 41, Ámsterdam, Elsevier, pp. 393-408.
- DESCOMBE, M. (1999), *The good research guide for small-scale social research projects*, Buckingham, Open University Press, 120 pp.
- DUDA, A.M. y M.T. El-Ashry (2000), “Addressing the global water and environment crisis through integrated approaches to the management of land, water and ecological resources”, *Water international*, núm. 25, vol. 1, pp. 115-126.
- EASTER, K., G. Feder, G. Le-Moigne, y D. Duda (1992), “The World Bank’s Water Resources Policy”, en G. Le Moigne, K. Easter, W. Ochs y S. Giltner, *Water policy and water markets. Selected papers and proceedings for the World Bank’s Ninth Annual Irrigation and Drainage Seminar*, Annapolis, Maryland, pp. 11-16.
- FALKENMARK, M. (2003), *Water management and ecosystems: living with change*, vol. 9, Estocolmo, Global Water Partnership, TEC Background Papers.
- y J. Lundqvist (1995), “Water crisis: new approaches are inevitable”, en L. Ohlsson, *Hydropolitics, conflicts over water as a development constraint*, Londres, Zed Books, 267 pp.
- FERREIRA, S.H. y L.A. Botequilha (2006), “Integrating landscape and water-resources planning with focus on sustainability”, en B. Tress, G. Tress, G.L.A. Fry y J. Opdam, *From landscape research to landscape planning: aspects of integration education and applications*, Países Bajos, Springer, 310 pp.
- FRY, G.L.A. (2001), “Multifunctional landscapes-towards transdisciplinary research”, *Landscape and urban planning*, núm. 57, Ámsterdam, Elsevier, pp. 159-168.
- GERMAN ADVISORY COUNCIL ON GLOBAL CHANGE (1997), *World in transition: ways towards sustainable management of freshwater resources*, WBGU Annual report, Ámsterdam, Springer, [http://www.wbgu.de/wbgu\\_jg1997\\_engl.html](http://www.wbgu.de/wbgu_jg1997_engl.html)
- GLEICK, P.H. (1998), “The human right to water”, *Water Policy*, núm. 1, Estados Unidos, World Water Council, pp. 487-503.
- (2001), “Safeguarding our water. Making every drop count”, *Scientific American*, Nueva York, Scientific American Inc., pp. 29-33.
- GRUMBINE, R.E. (1990), “Protecting biological diversity through the greater ecosystem concept”, *Natural Areas Journal*, núm. 10, vol. 3, EU, Rockford: Natural Areas Association, pp. 114-120.
- (1994), “What is ecosystem management?”, *Conservation Biology*, núm. 8, Arlington, Blackwell Publishing, pp. 27-38.

- HAEBER, R. y J. Franklin (1996), "Forum perspectives on ecosystem management", *Natural Resources Journal*, núm. 36, Albuquerque, University on New Mexico School of Law, pp. 1-28.
- HEALEY, M.C. (1998), "Paradigms, policies, and prognostication about the management of watershed ecosystems", en R.J. Naiman y R.E. Bilby, *River ecology and management. lessons from the pacific coastal ecoregion*, EU, Springer, 540 pp.
- HIRSCH, H.G., D. Bradley, C. Phol, S. Rist, y U. Wiessman (2006), "Implications of transdisciplinarity for sustainability research", *Ecological Economics*, núm. 60, pp. 119-128.
- HOEKSTRA, A. (2000), "Appreciation of water: four perspectives", *Water Policy*, núm. 1, vol. 6, Londres, IWA Publishing, pp. 605-622.
- HURNI, H. (1997), "Concepts of sustainable land management", *ITC Journal*, 1997-3/4, *special congress issue: Geo-information for sustainable land management (SLM)*, Ámsterdam, ITC, pp. 210-215.
- JASPERS, W. (2003), "Institutional arrangements for integrated river basin management", *Water Policy*, núm. 5, vol. 2, Londres, IWA Publishing, pp. 77-90.
- KALBERMATTEN, J.M., R. Middleton y R. Schertenleib (1999), "Household-centred environmental sanitation", Suiza, EAW-SANI, pp. 1-17.
- KAJANUS, M., J. Kangas y M. Kurttila (2004), "The use of value focused thinking and the A'WOT hybrid method in tourism management", *Tourism Management*, núm. 25, Ámsterdam, Elsevier, pp. 499-506.
- KEEN, M. (2003), "Integrated water management in the south pacific: policy, institutional and socio-cultural dimensions", *Water Policy*, núm. 5, vol. 2, IWA Publishing, Londres, pp. 147-164.
- KINZIG, A. (2001), "Bridging disciplinary divides to address environmental and intellectual challenges", *Ecosystems*, núm. 2, Nueva York, Springer, pp. 709-715.
- KOUDSTAAL, R., F.R. Rijsberman y H. Savenije (1992), "Water and sustainable development", *Natural Resources Forum*, núm. 6, vol. 4, Arlington, Blackwell Publishing, pp. 227-290.
- KUNDZEWICZ, Z.W. (1997), "Water resources for sustainable development", *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, núm. 42, vol. 4, Oxfordshire, IAHS Press, Institute of Hydrology, pp. 467-479.
- LATTUCA, L.R. (2001), *Creating interdisciplinarity: interdisciplinary research and teaching among college and university faculty*, Nashville, Vanderbilt University Press, 190 pp.

- McKINNEY, D., X. Cai, M. Rosegrant, C. Ringler y C. Scott (1999), "Modeling water resources management at the basin level: review and future directions", *SWIM Paper 6*, Sri Lanka, International Water Management Institute, 20 pp.
- NAGANO, G. (2006), Comunicación personal. M. en Arq., profesor de la División de Ciencias y Artes para el Diseño, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco.
- NAIMAN, R.J., J.J. Magnuson y P.L. Firth (1998), "Invited feature: integrating cultural, economic, and environmental requirements for fresh water", *Ecological Applications*, núm. 8, vol. 3, Nueva York, ESA Publications, pp. 571-579.
- NEWSON, M. (1992), *Land, water and development, river basin systems and their sustainable management*, Londres, Routledge, 150 pp.
- SÁNCHEZ, O.E. y G.A. Sánchez (1998), "Las perspectivas de la planeación de los recursos hidráulicos al inicio del tercer milenio", Asociación Mexicana de Hidráulica, A.C., *Memoria xv Congreso Nacional de Hidráulica*, Oaxaca, Mexico, octubre, pp. 37-48.
- SERAGELDIN, I. (1995), "Strategic water resource management: themes for a new millennium". *Proceedings of the Fifth Stockholm Water Symposium*, agosto, pp. 13-18.
- SLOCOMBE, D.S. (1993), "Implementing ecosystem-based management: development of theory, practice and research for planning and managing a region", *BioScience*, núm. 43, Washington, The American Institute of Biological Sciences, pp. 612-622.
- (1998), "Lessons from experience with ecosystem-based management", *Landscape and urban planning*, núm. 40, Ámsterdam, Elsevier, pp. 31-39.
- REID, D. (1995), *Sustainable development: an introductory guide*, Londres, Earthscan, 215 pp.
- ROMM, J. (1993), "Sustainable forestry, an adaptive social process", en E. Applet, N. Johnson, J.T. Olson y V.A. Sample, *Defining sustainable forestry*, Washington, Island Press, 180 pp.
- TRESS, B. y G. Tress (2001), "Capitalising on multiplicity: a transdisciplinary systems approach to landscape research", *Landscape and urban planning*, núm. 57, Ámsterdam, pp. 143-157.
- (2005), "Integrative studies on rural landscapes: policy expectations and research practice", *Landscape and urban planning*, núm. 70, Ámsterdam, Elsevier, pp. 177-191.
- y G. Fry (2006), "Defining concepts and process of knowledge production in integrative research", en B. Tress, *From landscape re-*

- search to landscape planning. Aspects of integration, education and application*, Países Bajos, Springer, 305 pp.
- THOMPSON, K.J. (2000), "Voices of Royaumont", en M.A. Somerville y D.J. Rapport, *Advances in sustainable development. trans-disciplinarity: recreating integrated knowledge*, Londres, EOLSS Publishers, 270 pp.
- VAN-DE-KERKHOL, M. y P. Leroy (2000), "Recent environmental research in the Netherlands: towards post-normal science?", *Futures*, núm. 32, vols. 9-10, Ámsterdam, Elsevier, pp. 899-911.
- WHITE, S. (1998), *Wise water management: a demand management. Manual for water authorities*, Camberra, Water Services Association of Australia, 37 pp.
- WILSON, E.O. y R.M. Peter (1998), *Biodiversity*, Washington, D.C., National Academic Press, 197 pp.
- WOLFF, G. y P. Gleick (2002), "The soft path to water", en P. Gleick, *The world's water 2002-2003, The biennial report on freshwater resources*, Washington, DC, Island Press, 550 pp.
- YAFFEE, S.L., A.F. Phillips, I.C. Frentz, P.W. Hardy, S.M. Maleki y B.E. Thorpe (1996), *Ecosystem management in the United States: an assessment of current experience*, Washington, DC, Island Press, 349 pp.
- YAFFEE, S.L. (1999), "Three faces of ecosystem management", *Conservation biology*, núm. 13, vol. 4, Arlington, Blackwell Publishing, pp. 713-725.
- YOUNG, K. (2000), "Transdisciplinarity: postmodern buzz word or new method for new problems", en M.A. Somerville y D.J. Rapport (eds.), *Advances in sustainable development. transdisciplinarity: recreating integrated knowledge*, Londres, EOLSS Publishers, 25-38 pp.

*Más siglos, más túneles...  
y más inundaciones en la Ciudad de México.  
Hacia el cuarto centenario de la edificación  
de túneles en la ciudad*

*El 17 de septiembre de 2008, la Ciudad de México cumplió  
sus primeros cuatrocientos años de hacer tubos o túneles,  
una herencia española que ha pretendido, sin lograrlo,  
resolver las históricas inundaciones de nuestra urbe.*

EN LOS ÚLTIMOS 400 años, la Cuenca de México ha sufrido una de las transformaciones ecológicas más radicales del planeta. Ello, producto de la imposición sobre la naturaleza, de una visión científica parcial que requiere modificarse. En aras de desaguarlo todo, debido a las inundaciones, y convertir a la ciudad, como alguna vez dijera Humbolt, en pura tierra firme, el agua ha sido tratada como enemigo. Desaparecieron de la Cuenca de México para enviarse al mar 1,100 kilómetros cuadrados de agua atravesando con túneles sus montañas, grandiosas obras que antes, orgullo de los imperios, son hoy orgullo de los gobiernos. Todo empezó poco tiempo después de la conquista española, precisamente cuando se destruyeron y modificaron las obras indígenas que mantenían el equilibrio hidráulico, como fueron los albarrones de Netzahualcóyolt, Ecatepec y Mexicaltzingo. A partir de entonces, reyes y virreyes –preocupados por los estragos de las constantes inundaciones que sufría la recién destruida Tenochtitlan– mandaron traer de ultramar la ciencia europea: geógrafos, cosmógrafos y demás científicos llegaron a la capital de la Nueva España, para cumplir infructuosamente el esperado anhelo no cumplido hasta hoy: evitar las inundaciones; a pesar de que, a lo largo de los últimos cuatro siglos, se han edificado cuatro grandes túneles y hoy, a finales de la primera década del siglo XXI, se inicia la construcción del quinto. Aquí la breve historia de los

\* Profesor-investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

limitados alcances y resultados que ha tenido la edificación de dichos y soberbios túneles.

### TÚNEL DE HUEHUETOCA O TAJO DE NOCHISTONGO

EL TAJO de Nochistongo fue la primera obra dirigida por el cosmógrafo Enrico Martínez. Es considerada la obra de ingeniería más importante de toda América durante la Colonia. Su propósito fue evitar graves inundaciones, como las ocurridas a mediados de 1604 y de 1607. La obra se inició el 30 de noviembre de ese último año, con una primera visita del virrey Luis de Velasco (hijo) y se concluyó 10 meses después, el 17 de septiembre de 1608. Alrededor de 60,000 indígenas, con el uso del azadón y la pala, construyeron el túnel de siete kilómetros de largo, 3.5 metros de ancho y 4.2 de alto, el cual atravesó la Cuenca de México después de perforar la montaña de Huehuetoca hacia Nochistongo, para conducir el agua del Lago de Zumpango hasta los ríos Tula, Moctezuma y Pánuco, y de ahí, desalojarla finalmente al mar, en el Golfo de México. Hubo gran algarabía, fiestas y festejos. A Enrico Martínez, se le condecoró y hasta se le regaló una cadena de oro... Pero no dio resultado; 20 años después, en 1629, la ciudad sufrió la más grande inundación de toda su historia por cinco años; ni la Virgen de Guadalupe, trasladada de la Villa a la Catedral, pudo disminuir el nivel de las aguas, que permanecieron hasta 1634.

En el mes de julio los aguaceros fueron mayores; se inundaron los barrios [...] en los suburbios, las casas de adobe se derrumbaban, causando la ruina y aun la muerte a los habitantes pobres [...] muchísimos quedaron lisiados y morían de hambre [...] el 5 de septiembre eran numerosas las canoas que navegaban por los arrabales de Santiago Tlatelolco [...] los frailes y las monjas empezaron a abandonar los conventos. Las familias acomodadas se resolvieron a emigrar principalmente a Puebla. El 21 de septiembre, día de San Mateo,



el copiosísimo aguacero duró 36 horas seguidas [...] el 22, la ciudad amaneció completamente inundada subiendo el agua en las partes más altas media vara [0.42 metros], y en otras vara y media [1.26 metros] y en las más bajas, más de dos varas [más de 1.68 metros]. El pánico fue inmenso, los daños materiales innumerables, las desgracias espantosas; no se oían sino clamores, pidiendo a Dios misericordia. Cesaron los sermones, el comercio de las tiendas [...] El 16 de octubre el arzobispo escribía al rey que “de veinte mil familias españolas vecindadas en México, sólo habían permanecido en la ciudad cuatrocientas, y que treinta mil indios habían perecido en aquellos días, unos ahogados, otros sepultados bajo las ruinas y no pocos, de hambre. La peste sobrevino al siguiente año [1630] ocasionada por la humedad, el hambre, la putrefacción de los cadáveres de tantos animales y aún de muchos pobres que a cada paso morían. Ante la desesperación, se buscaron los famosos sumideros y también fue inútil; hasta fines de 1633 la inundación empezó a descender, producto de fenómenos naturales [...] la evaporación lenta pero eficaz, por una parte, y temblores de tierra, por otra, abrieron grandes grietas por donde por fin se evacuaron las aguas. (GTC, 2005).

Una de las causas de tal inundación se atribuyó a los limitados cálculos del túnel de Enrico Martínez, y fue entonces cuando se decidió abrir la montaña con pico y pala a lo largo de los siete kilómetros, para convertirlo en canal abierto o tajo; los trabajos que duraron 150 años. Por eso, a partir de ahí, a la obra se le conoce como el Tajo de Nochistongo, y desde entonces funciona... bien, hasta nuestros días. Sin embargo, esta adecuación de túnel a tajo abierto demostró, desde entonces, las primeras limitaciones para resolver las inundaciones. Por ello, la edificación de nuevos túneles se interrumpió durante más de dos siglos y se optó por canales, con varios proyectos y obras como antecedente y, al parecer, las recomendaciones de Humbolt de abrir un canal desde el lago de Texcoco. Así, a principios del siglo XVIII se abre el canal hoy conocido

como Castera o Guadalupe; fue conectado al Tajo de Nochistongo para desalojar, durante casi un siglo, el agua de los lagos de Xaltocán y San Cristóbal. Pero como pasa siempre en la historia de la ciudad, después de las catástrofes, se toman acciones parciales, y se repiten los errores; una vez olvidados los estragos de la gran inundación de 1629, atribuida a la incapacidad del túnel de Enrico Martínez, hacia mediados del siglo XIX volvieron a la escena pública las decisiones heredadas de la ciencia renacentista europea: edificar más túneles; y se dio paso al segundo túnel.

### TÚNEL DE TEQUIXQUIAC Y EL GRAN CANAL DEL DESAGÜE

FUE AUTORIZADO en 1867, durante los tiempos imperiales de Maximiliano de Habsburgo, quien dijo “es una obra hidráulica para que las aguas de los lagos se dominen [y] la capital quede para siempre libre de una inundación”. La autoría del proyecto se le atribuye a Luis Espinosa, aunque en realidad estuvo basado en proyectos anteriores de Francisco de Garay y un teniente de nombre M.L. Smith. Tardó en construirse alrededor de 30 años. Se trata de un extenso canal de casi 50 kilómetros de largo construido desde San Lázaro hasta Zumpango; y de ahí un túnel de 11 kilómetros perforó por segunda vez las montañas de la cuenca, hasta el pueblo de Tequixquiac. Por ambas obras se condujeron, las aguas de los lagos de Texcoco, San Cristóbal y Xaltocán, igualmente, hasta el Golfo de México por el mismo sistema hidrológico Tula-Moctezuma-Pánuco. La profundidad del túnel fue ahora de 100 metros y su diámetro de casi cuatro; fue inaugurado el 17 de marzo de 1900 en medio de grandes festejos, por el presidente Porfirio Díaz, quien escuchó en compañía de la elite industrial e intelectual de esa época el acta oficial que decía: “La obra libraré a México de inundaciones y mejorarán las condiciones higiénicas de la capital”. Un mes después, en abril de 1900, el mismo presidente declaró ante el Congreso: “Se ha dado cima al ideal de tres siglos, salvando a nuestra capital de que la inunden sus lagos

y de que la infesten, por falta de salida, sus propios desechos”. La historia nuevamente desmintió tales aseveraciones. En julio del mismo año, a sólo cuatro meses de la inauguración del fastuoso túnel, la ciudad sufriría otra inundación; y al año siguiente, una más. Aquí los relatos textuales: “[...] a fines de este año, el agua llegó hasta las plataformas de los tranvías; y en 1901 hubo nuevas inundaciones en Santa Ana, La Candelaria, Santiago, San Lázaro, Los Ángeles, La Tlaxpana, Niño Perdido, y en general, en la parte suroeste de la ciudad”. Durante la primera mitad del siglo xx, el vertiginoso crecimiento de la ciudad fue acompañado de constantes inundaciones, producto de las nuevas limitaciones que sufrían los drenajes, y, por supuesto, dicho túnel porfiriano. Por tanto, tiempo después, se decide edificar el tercero, denominado:

#### NUEVO TÚNEL DE TEQUIXQUIAC

EN EFECTO, entre 1937 y 1942 se decide edificar un túnel más, de características técnicas similares y de trazo casi paralelo al primer túnel de Tequixquiac, es decir, 11 kilómetros de largo, cuatro metros de diámetro y 100 de profundidad; tampoco fue suficiente, pues al poco tiempo de inaugurado, aparecieron, con todo y el túnel, inundaciones en 1942 y 1944; y además, en 1948, derrumbes de sus paredes interiores, que obligaron a cerrarlo y fue abierto nuevamente hasta 1955. Al parecer, dichos derrumbes fueron producto de errores en el cálculo de los caudales incrementados por “los drenajes de aguas freáticas y subterráneas en su recorrido” (CFE, 1952: 113). Independientemente de tal situación, el argumento para edificar este nuevo túnel era que ahora sí quedarían resueltas las inundaciones de la ciudad durante las siguientes décadas. Desafortunadamente no fue así. Aun con dichos túneles (uno funcionado y otro en reparación) en 1949:

[...] ocurrió una gran inundación en casi todo el Centro Histórico de la ciudad. El agua alcanzó un tirante de un metro en la avenida 16 de Septiembre, algunas construcciones permanecieron sumergidas durante casi tres meses [...] entre las

colonias más afectadas se cuentan la Cuauhtémoc, la Roma Sur, la del Valle, Narvarte y la Condesa (GTC, 2005).

Al año siguiente, en julio de 1950, tiene lugar la primera de las grandes inundaciones de mediados del siglo xx; ésta, con precipitaciones pluviales estimadas en 12 mm por hora, provocando

[...] que se inundaran de agua y lodo dos terceras partes de la Ciudad de México. Las consecuencias de este alud [...] fueron desastrosas y funestas. Las colonias más afectadas fueron Cuauhtémoc, Escandón, Tacubaya, Roma Sur, Del Valle y Narvarte. Hubo lugares [...] donde el agua alcanzó 3 metros y arrasó automóviles y casas; se recogieron 5 muertos y numerosos heridos (*El Universal*, 1972; DDF, 1975: 206).

Un año después, en julio y agosto de 1951, la ciudad sufrió, en medio de un preocupante hundimiento advertido por el doctor Nabor Carrillo, la más grande y reciente inundación de la ciudad.

El 15 de julio un torrencial aguacero descargó sobre el Valle de México la más copiosa precipitación pluvial convirtiendo a la capital y varias delegaciones en un inmenso lago [...] la inundación, una de las más desastrosas que ha ocurrido en el DF, causó pérdidas incalculables. Desde Pino Suárez hasta Bucareli las calles fueron cubiertas por agua. En las colonias Guerrero, San Juanico, Santa Julia, Peralvillo, Merced, Tacuba, Argentina, Legaria, Pensil y Vallejo, el agua subió más de medio metro. El 18 continuó la tremenda inundación que afectó, además, la colonia Guerrero y Santa María la Rivera. La respuesta inmediata fue la puesta en operación de potentes bombas para disminuir el nivel del agua, pero fue inútil (DDF, 1975: 210). El día 30 la inundación alcanzó las calles de 16 de Septiembre, Motolinia, Bolívar, Artículo 123, López y San Juan de Letrán (*Excelsior*, 1951).

Algo estaba fallando, pues era evidente que los túneles no funcionaban como medida eficaz para resolver las inundaciones. Se acalló el debate y las evaluaciones críticas sobre dicha catástrofe hidráulica y, paradójicamente, aparecieron con más fuerza en los círculos del poder, las mismas políticas hidráulicas de seguir edificando túneles. Las inundaciones continuaron y para la sexta década del siglo xx, los hundimientos afectaban ya la pendiente del Gran Canal del desagüe y por ende, la salida de agua por ambos túneles de Tequixquiac. Eso fue suficiente para justificar la edificación del cuarto túnel, llamado:

#### EMISOR CENTRAL E INTERCEPTORES DEL DRENAJE PROFUNDO

INICIADO en 1966 y concluido en 1975, es simplemente la red de túneles utilizados como drenajes urbanos más grande y extensa del mundo. El mayor, denominado emisor central que perforó la cuenca por cuarta vez, tiene 51 kilómetros de longitud, un diámetro original de 6.5 metros y se encuentra a una profundidad máxima de 240 metros, y por él se conduce el agua de la Cuenca de México hacia los distritos de riego de agua negra en Hidalgo, y la restante, por el río Tula hasta el Golfo de México. Hay además, otros casi 100 kilómetros de túneles de menor dimensión conectados al emisor central, llamados interceptores, y edificados a 30 metros de profundidad. El Drenaje Profundo hereda las concepciones hidráulicas del pasado, en el sentido de que, como los tres grandes túneles anteriores, se han utilizado para extinguir los lagos y seguir expulsando más agua pluvial que residual.

Mencionemos aquí por su importancia, lo afirmado sobre el Drenaje Profundo por el entonces presidente Luis Echeverría en su informe presidencial de 1973:

[...] Esta obra, alejada de la observación pública, evitará inundaciones en la Ciudad de México; el de 1974: [...] librará a la metrópoli de inundaciones; y el de 1975, año de su inauguración: El Sistema de Drenaje Profundo será una de

las obras más importantes del siglo que mantendrá a la Ciudad de México a salvo de graves peligros y la dotará de un eficiente sistema de expulsión de las aguas negras y pluviales.

Sin embargo, durante las siguientes décadas del siglo xx y lo que va del xxi, la historia volvió a mostrarnos la incapacidad de los túneles para enfrentar las constantes inundaciones, como bien lo advirtió públicamente, hacia 1960, un crítico del Drenaje Profundo, el ex rector de la UNAM, Doctor Nabor Carrillo. Efectivamente, hoy el emisor central del Drenaje Profundo ha reducido su capacidad de desalojo, probablemente debido a fracturas, reducción de su inclinación o por algún taponamiento. Sea lo que fuere, en los últimos años, las inundaciones no se han reducido y, por el contrario, crecen en extensión y en lugares simultáneos. Algunos datos: el 15 de junio del 2000, se produjo cerca de la Cabeza de Juárez en Iztapalapa, una inédita inundación, donde (según datos de Ramón Domínguez Mora, uno de los más experimentados investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM) el agua en la lumbrera 3 del Drenaje Profundo ascendió hasta la cota 2,230 metros sobre el nivel del mar (msnm), esto es, que ascendió más de 20 metros de altura hasta salir a la superficie; agrega, además, que en la lumbrera 0 del mismo Drenaje Profundo, aladaña a otra unidad habitacional, la de Acueducto de Guadalupe, el agua rebasó la cota 2,222 msnm, y alcanzó los 10 metros debajo del nivel del suelo, lo cual estaría indicando una tendencia preocupante, debido al peligro que representaría el que el agua ascendiera en época de lluvias al nivel de la calle en otras zonas densamente pobladas. Desde el 2001, el citado investigador advirtió que “La Ciudad de México está sujeta a un riesgo muy alto de inundaciones graves”. Hay que tomar en cuenta que en el 2005 tuvieron lugar diversas inundaciones que contrastan, por su cantidad y magnitud, con los años anteriores. El jueves 28 de julio de ese año se inundaron simultáneamente las zonas del poniente, sur y centro de la ciudad, donde el agua alcanzó, en algunos puntos, un metro de altura. Los más críticos fueron diversos tramos del Viaducto Miguel Alemán, el Periférico y el

Circuito Interior, la carretera México-Toluca, Francisco del Paso, Eje Central Lázaro Cárdenas, Cuauhtémoc, Revolución, Constituyentes, Patriotismo y Río Mixcoac (*La Jornada*, 2005: 38). Al año siguiente, en 2006, se inundaron algunas casas y oficinas del Centro Histórico y, por vez primera, las colonias Roma y Condesa. Producto de esta misma inundación, el Río Hondo, en su paso por Naucalpan, cobró dos víctimas (papá e hijo) cuyos cuerpos sin vida fueron localizados días después. El 15 de agosto el río La Compañía sufrió un severo desbordamiento, similar por su magnitud al sufrido en mayo de 1999; éste inundó por varias horas cuatro kilómetros de la autopista a Puebla. Entre el 6 y el 7 de octubre, la ciudad volvió a sufrir inundaciones en 70 sitios simultáneamente, entre los que destacan los circundantes al Viaducto, el Gran Canal del desagüe y el río de los Remedios, y a un lado de éste, el agua alcanzó los 80 centímetros sobre la avenida Central; por último, entre el 11 y el 12 de octubre del mismo año, la inundación se presentó en todos los puntos cardinales de la ciudad; en el norte, en diversas colonias de Naucalpan, Miguel Hidalgo, Azcapotzalco y Cuajimalpa; en el sur, principalmente en Ciudad Universitaria y sus alrededores; en el poniente, en las colonias circundantes al casco de Santo Tomás y la delegación Álvaro Obregón; en el área central, la Roma, Condesa, Juárez y Cuauhtémoc; y en el oriente se volvió a desbordar, por segunda vez en el año, el canal de La Compañía, e inundó algunas colonias de Ciudad Netzahualcóyotl.

Todos estos acontecimientos relatados nos advierten que, de seguir edificando exclusivamente túneles como alternativa para reducir las inundaciones, estamos ensanchando, cada vez más, el camino hacia una catástrofe hidráulica. Pero muy a pesar de ello, a mediados del 2007, se tomó la decisión, con la anuencia de los tres niveles de gobierno, de iniciar la construcción del quinto túnel.

#### EL EMISOR ORIENTE

LOS PRIMEROS trabajos se iniciaron en 2008 y, según la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y el Gobierno del Distrito Federal,

tendrá 60 kilómetros de largo y alrededor de siete metros de diámetro, sin conocer aún su mayor profundidad; irá del Río de los Remedios en Tlalnepantla, hasta el Salto, en Hidalgo, y será la quinta perforación de la Cuenca de México para conducir agua, probablemente tratada, hasta los distritos de riego de Hidalgo; y la sobrante, si existiera, se enviará, igualmente, hasta el Golfo de México por el Río Tula. A mediados del 2007, el jefe del Gobierno del Distrito Federal declaró que la obra: “significará muchísimas décadas por delante de tener equilibrado todo el sistema de drenaje y evitará [...] inundaciones”. La Conagua no se quedó atrás: “Hay que iniciar los trabajos de inmediato, pues constituyen una forma de evitar riesgos de inundaciones” (*La Jornada*, 2007).

#### EN SÍNTESIS

LA BREVE historia hidráulica aquí narrada abre un claro signo de interrogación sobre las políticas hidráulicas que sustentan exclusivamente la edificación de más túneles para, supuestamente, evitar futuras inundaciones en la ciudad. Son políticas adoptadas por lo menos durante el siglo xx y lo que va del xxi, y aprobadas en los últimos años por instancias legislativas integradas por diversos partidos políticos.

Las políticas hidráulicas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México deben ser pensadas y diseñadas por las instancias legislativas, y no exclusivamente por las ejecutivas. En ese sentido, sería conveniente iniciar un amplio debate técnico con los círculos gubernamentales que sustentan la construcción del Emisor Oriente como la única posibilidad de evitar futuras inundaciones en la ciudad, y valorar, sin ideologías o efímeras confrontaciones políticas de por medio, si vale la pena perforar por quinta vez la Cuenca de México en lugar de ocupar primero, por ejemplo y con algunas adecuaciones, el Tajo de Nochistongo; el mismo que por estos tiempos, cumple 400 años de funcionar. Otro conjunto de propuestas serán de más largo plazo.

La historia hidráulica de nuestra cuenca demuestra que, a lo largo de los últimos 400 años, los magnos túneles no han sido capa-



ces de evitar las 25 grandes inundaciones que ha sufrido la ciudad ni las que padecemos año con año en época de lluvias. En cambio, sí han logrado que durante esos cuatro siglos 80% del agua que se expulsa sea de lluvia, la misma que podría utilizarse en el consumo de la población para disminuir la extracción de agua del subsuelo en la Cuenca de México; y además, que no sea traída en el futuro de cuencas lejanas. Es cierto que tener una cuenca cerrada ha sido una fuerte limitación para controlar los balances del agua, pero también lo es, y eso lo hemos olvidado o nos lo han hecho olvidar, que es una de las cuencas de México con mayor abundancia de agua (700 milímetros promedio anual), gran parte de la cual es desperdiciada al enviarla a los drenajes. Al parecer, hemos errado los caminos y las estrategias hidráulicas tratando de expulsar por túneles casi toda el agua pluvial, en lugar de detenerla y aprovecharla, y evitar así las inundaciones. El aprovechamiento del agua de lluvia de la Cuenca de México, la de sus 45 ríos que tienen agua limpia en sus partes altas, la de sus actuales manantiales y algunos de sus lagos, conforma un nuevo paradigma del agua que debe orientar las nuevas políticas públicas si verdaderamente deseamos la sustentabilidad ambiental, la equidad en los consumos y evitar, sobre todo, una nueva catástrofe hidráulica.

## BIBLIOGRAFÍA

- CFE (2003), G. Cruickshank, Fernando Hiriart *et al.*, *Contribución de la CFE a la solución del problema de abastecimiento de agua a la Ciudad de México*, Imprenta CFE, 1952, segunda edición, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- DDF (1975), *Memoria de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del DF*, 4 tomos, México.
- (1975), p. 210.
- Excelsior* (1951), 16, 17 y 18 de julio.
- GTC (2005), *Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México*, Enrique Santoyo Villa, Efraín Ovando Shelley, Federico Mooser y Elvira León Plata.
- La Jornada* (2005), 28 de julio, p. 38.
- (2007), 12 de julio.



Tercera parte

*Innovación tecnológica en la UAM para  
la sustentabilidad hídrica*



EUGENIO GÓMEZ-REYES\*  
VÍCTOR H. TÉLLEZ-ARRIETA\*\*  
Y REBECA QUIÑONEZ-PINÓN\*\*\*

## *Detección de fugas no visibles en redes de agua*

### INTRODUCCIÓN

DENTRO DE LAS ALTERNATIVAS no convencionales de abastecimiento de agua, la de mayor capacidad potencial de suministro y de respuesta inmediata es la recuperación de volúmenes perdidos por fugas en la red de distribución; tan sólo se ha determinado que del volumen de agua empleada por los organismos operadores del país, 51% se pierde en fugas, o bien se entrega a los usuarios sin ser cobrado (Conagua, 2007). Para la detección de las fugas visibles, se cuenta con los reportes oportunos de los ciudadanos afectados. Sin embargo, las no visibles presentan un reto superior en cuanto a su localización, dado que es muy frecuente encontrar fugas que han producido canalizaciones y, en el mejor de los casos, afloran en sitios apartados de la falla de la tubería, por lo que es necesario recurrir a técnicas específicas de detección que permiten ubicar con precisión el sitio donde está el daño. A la fecha, se han utilizado varios métodos para auxiliarse en la detección de estas fugas, por ejemplo, control de presión, distritos hidrométricos, sondeos acústicos, presión diferencial, entre otros. Estos métodos presentan los inconvenientes de ser laboriosos en su realización, muy costosos, de aplicación perió-

\* Profesor-investigador de ingeniería hidrológica, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa [egr@xanum.uam.mx]

\*\* Profesor-investigador del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa [vict@xanum.uam.mx]

\*\*\* Profesora-investigadora del Departamento de Hidrobiología, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa [mrqp@xanum.uam.mx]

dica, de mediana efectividad y no ofrecen la alternativa de la detección oportuna de las fugas. Un método adecuado para esto último o cuando no son visibles debe considerar un catastro técnico del sistema de buena calidad. Por tanto, el sistema debe ser detallado, actualizado e interactivo, en donde se incorpore información de tipo social (planos urbanos, densidad y distribución socioeconómica de la población, uso del suelo, registro de usuarios, zonas de consumos), física (corrosividad del suelo, fallas y fracturas, subsidencia del terreno, carga por tráfico), de la red de distribución (ubicación y operación de válvulas, diámetro y antigüedad de tuberías y válvulas, conexiones y profundidad de tendido) y de su operación hidráulica (zonas de presión, caudales, velocidades, distribución y operación de pozos y tanques de regulación). Este método de detección –aunque conocido que debe ser el adecuado– había sido difícil de concebir debido a la cantidad de información a integrar y a la técnica para detectar las fugas.

Actualmente, el desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) permite incorporar tanta información como la contenida en un catastro técnico del sistema de distribución de agua potable. Asimismo, los algoritmos numéricos para la simulación del flujo transitorio en redes de distribución de agua no sólo son capaces de simular el funcionamiento hidráulico de la red, sino también de localizar las fugas. Los datos requeridos para los modelos de flujo transitorio en las redes de agua hoy en día no sólo pueden ser fácilmente obtenidos, sino hasta monitoreados de manera automática y teletransferidos en tiempo real, por lo que ahora es posible utilizar la tecnología adecuada para la detección de fugas no visibles. En este documento se describe un método para dicha detección en la red secundaria de agua potable (Sistema de Información Activo de Redes de Agua Potable, SIARDA), basado en la simulación numérica del flujo transitorio y en el monitoreo de la presión en la red de distribución, en donde también se incluye toda la información del catastro técnico del sistema de distribución de agua potable, así como las causas principales de la generación de fugas. En las siguientes secciones

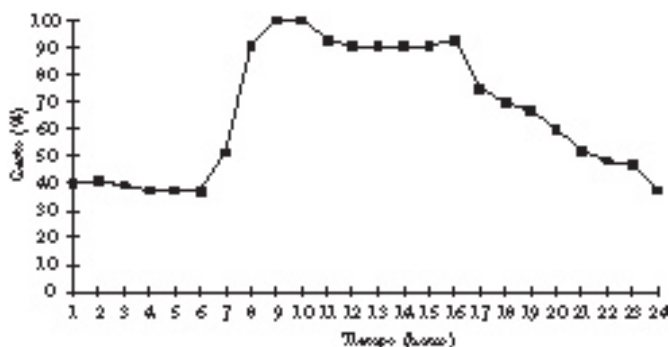
se detallan las componentes de SIARDA (modelo numérico, monitoreo y SIG). Luego se explica la integración de los componentes y se describe cómo se lleva a cabo la detección de fugas con SIARDA. Finalmente, se presentan casos de aplicación y las conclusiones.

## MODELO NUMÉRICO

EL FUNCIONAMIENTO hidráulico de las redes de distribución de agua potable, en donde interesa determinar las cargas (presión) en los extremos de los tubos y los gastos que fluyen en los mismos, generalmente se realiza bajo condiciones de flujo en régimen permanente, por ejemplo, cuando las cargas y los gastos permanecen constantes. De esta manera, en una red donde se conoce por lo menos una carga y los gastos que entran o salen (consumo a través de las tomas domiciliarias) a la red, es posible calcular las cargas y/o gastos en toda la red. Sin embargo, las condiciones de estacionalidad nunca existen en estas redes, dado que ello obedece principalmente a la demanda de agua por las diversas actividades de los usuarios (domésticos, comerciales, industriales y de servicios públicos), estableciendo diariamente intervalos de tiempo de consumo pico (véase gráfica). Asimismo, las operaciones de bombeo para suplir o administrar el gasto de excedencia generan variabilidad diaria y semanal en el flujo de estas redes (Fox, 1984). Por consiguiente, el flujo en las redes de distribución de agua potable se presenta como de régimen transitorio, más que como estacionario.

El número de estudios dedicados a la simulación de flujos transitorios en redes de agua potable ha estado limitado (Karney y McInnis, 1992; Chaudhry, 1993; McInnis y Karney, 1995; Chen, 1995), debido a la complejidad de la misma red, así como al costo y dificultad de aplicar modelos transitorios y de obtener datos para sus calibraciones. Los modelos numéricos existentes para estos casos se basan en la ecuación unidimensional de movimiento para fluidos compresibles, descrita por la segunda ley de Newton y el principio de conservación de masa, en donde el

### VARIACIÓN HORARIA PROMEDIO EN EL FLUJO DE LA RED DE AGUA POTABLE DEL DISTRITO FEDERAL



Fuente: Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (SARH, 1981).

balance de fuerzas está determinado por la fuerza de presión, gravedad, inercia y fricción. La ecuación de movimiento usada por la mayoría de estos modelos numéricos es:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -gA \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{fQ|Q|}{2AD} \quad (1a)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (1b)$$

donde:

$Q$ : gasto

$t$ : tiempo

$x$ : dirección a lo largo de la tubería

$H$ : carga hidráulica

$A$ : área de la sección transversal del tubo

$g$ : aceleración de la gravedad



$c$ : velocidad de onda

$f$ : coeficiente de fricción

$D$ : diámetro de la tubería

De esta manera, las incógnitas por resolver en (1) son la carga hidráulica  $H$  en los nodos de red y el gasto  $Q$  que fluye por la tubería, considerando que conocemos las características físicas de la tubería (diámetro, rugosidad y longitud de los tubos), sus conexiones (trazo de la red), gastos de demanda (por ejemplo, gastos que salen de la red a través de las tomas domiciliarias) y elevaciones de tanques reguladores (por ejemplo, cargas hidráulicas conocidas). Estas ecuaciones son resueltas generalmente utilizando el método numérico de las características. Se ha preferido este método por su eficiencia computacional y su alta resolución de los fenómenos transitorios en hidráulica.

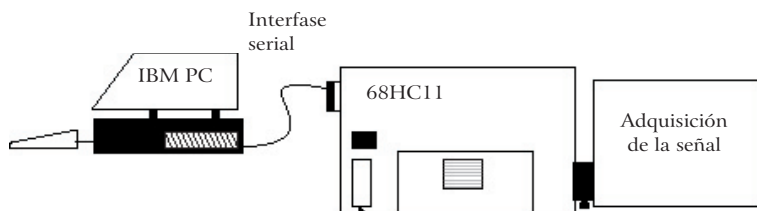
## MONITOREO

LA COMPONENTE de monitoreo está formada por sensores electrónicos remotos que adquieren y transmiten la información al modelo numérico. En esta adquisición de información, se pueden utilizar transductores de presión, como el AMETER-88, y transductores electromagnéticos, como el Program 30. Estos instrumentos son colocados en la parte superior de la tubería, donde mandan señales entre 0 y 500 miliamperes. Estas señales pasan a un convertidor de corriente a voltaje, que es introducido a un sistema digital, *v.gr.* microcontrolador 68HC11, a través del convertidor A/D (ADC) de 8 bits (figura 1). El AMETER-88 está diseñado con el chip piezorresistor silicón DC 200 (estándar), el cual genera un voltaje de salida proporcional a la presión aplicada del conducto de trabajo, mientras que el Program 30 es un sistema que mide flujo másico por inducción magnética, al ponerse en movimiento el fluido y generar un voltaje proporcional a su velocidad.

En cuanto al microcontrolador 68HC11, además de adquirir las señales analógicas (Motorola, 1992), también desarrolla: (1)

Programación inicial al sistema, lo que incluye inicializar a la memoria, contadores/temporizadores y el sistema de protección de *software*. (2) Procesamiento de la señal a través de la solución de las ecuaciones de movimiento por medio de una PC, donde el resultado de esta operación es transferido al microcontrolador para que éste solucione el error entre el flujo teórico y el flujo medido. (3) Reducción de los tiempos de ejecución y mínimos requerimientos de pila (*stack*) para cada operación básica de punto flotante del inciso anterior, mediante la programación de 16 bits a un sistema de ocho bits. (4) Transmisión de los resultados de vía puerto serial hacia una PC para solución del problema inverso y monitoreo del área de fuga.

FIGURA 1  
SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y TRANSMISIÓN  
DE DATOS A PROCESAR POR LA PC



Fuente: Téllez-Arrieta *et al.*, 2006.

SIG

EL SIG visualiza la información de la operación hidráulica de la red (incluidos el monitoreo y la modelación numérica), amplifica las zonas correspondientes a la detección de fugas y permite un análisis de la información contenida en el catastro técnico del sistema de distribución para determinar la causa y localización más probable de la fuga. Este componente maneja información del catastro técnico de la red de distribución de agua potable (planos urbanos, uso del suelo, registro de usuarios, conexiones, ubica-

ción y operación de válvulas), de la operación hidráulica (zonas de presión, caudales, velocidades, distribución y operación de pozos y tanques de regulación), así como información de las causas que originan rupturas de las tuberías (esfuerzos por fallas y fracturas, carga de tráfico, corrosión del suelo, antigüedad de la tubería, golpe de ariete). La configuración del SIG queda establecida con base en los diferentes tipos de información georreferenciada y a sus relaciones que auxilian en el conocimiento de la generación de fugas. Esta información está organizada en tres coberturas principales y dos fuentes directas de información:

- La cobertura de riesgo de fugas, que a su vez la integran aquellas capas con información espacial sobre las causas que originan rupturas en las tuberías, por ejemplo, esfuerzos por fallas y fracturas, carga de tráfico, corrosión del suelo, antigüedad de las tuberías, golpe de ariete y localización teórica de la fuga de acuerdo con su funcionamiento hidráulico (problema inverso).
- La cobertura de la red hidráulica, la cual integra toda la información espacial de la red de distribución y su funcionamiento hidráulico.
- La cobertura de sensores, la cual permite conocer la ubicación de los sensores de flujo y presión sobre los puntos de control de la red de distribución de agua potable.
- Información del monitoreo, lo cual permite visualizar las condiciones reales del flujo en la red de distribución.
- Información del modelo numérico, lo cual permite conocer las condiciones teóricas del flujo en la red de distribución.

Cada uno de estos grupos de datos integra diferentes temas que deben tener una referencia en el espacio para facilitar la visualización gráfica de esta información. Este despliegue de información desempeña un papel importante en la toma de decisiones, la generación de datos secundarios (mediante procesos analíticos) y la presentación cartográfica de resultados. Asimismo, es de con-

siderarse que la información requiere de una constante actualización para que el proceso analítico presente resultados precisos. Con esta finalidad, el SIG debe tener una estrategia específica para la captura de datos en forma tabular y digitalización cartográfica que permita una eficiente y constante renovación de la información que lo integra. Con base en el SIG, se realizan entonces los procesos que permiten la manipulación de la información primaria para obtener nuevas capas de información a partir de la superposición de dos o más de las primeras.

SIARDA

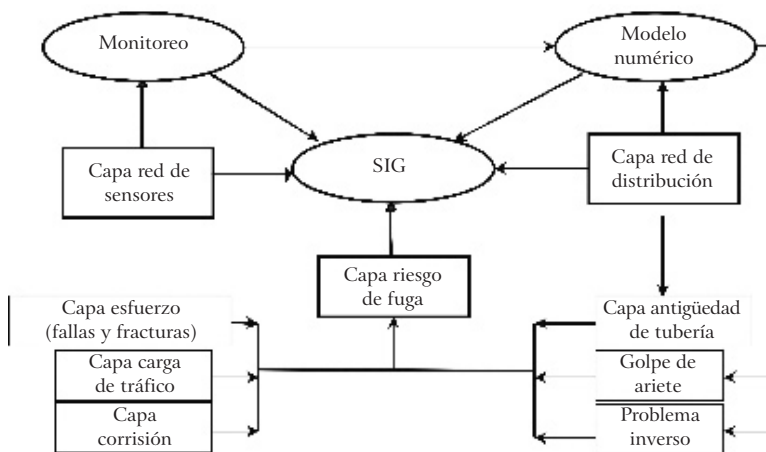
### *Estructura*

EL SISTEMA de Información Activo de Redes de Agua Potable (SIARDA) está constituido por tres componentes o módulos acoplados (figura 2). La componente del modelo numérico, cuya finalidad es simular el funcionamiento hidráulico (flujo transitorio) de la red de distribución de agua potable tomando en cuenta la red hidráulica (número de conexiones y tubos), tubería (diámetro, espesor y longitud de cada tubo, coeficiente de fricción y elasticidad para el tipo de material del tubo), condición inicial (carga hidráulica en los nodos y gasto en la tubería), condición del nodo (presión, demanda o gasto), así como condiciones de frontera (especificación del tiempo y valores de presión o gasto en los nodos de frontera). Los datos de la carga hidráulica para las condiciones iniciales y de frontera en los nodos son obtenidos mediante el componente de monitoreo, por medio de sensores de flujo y de presión sobre la red, mientras que los datos de consumo son inferidos a partir del análisis socioeconómico y del consumo de agua de la población.

El módulo de monitoreo tiene la función de registrar y transmitir información de las condiciones del flujo en la red. Esta información es obtenida mediante sensores de flujo y presión, instalados en puntos de control de la red de distribución de agua

potable y programados para mediciones de alta frecuencia (100 mediciones/segundo). La señal es transmitida vía puerto serial hacia una PC para solución del modelo numérico.

FIGURA 2  
SISTEMA DE DETECCIÓN DE FUGAS NO VISIBLES



Fuente: Gómez-Reyes y Arredondo-Figueroa, 1999.

El SIG tiene la finalidad de incorporar los datos del catastro técnico de la red de distribución de agua potable, del funcionamiento hidráulico de la red, de los monitoreos y de las causas que originan rupturas de las tuberías. Este componente permite visualizar toda la información incorporada.

### *Funcionamiento*

Una vez integradas las tres componentes, el acoplamiento de éstas establece el funcionamiento de SIARDA. La localización de fugas no visibles en redes secundarias de distribución de agua está prevista de la siguiente manera:

Primero se empieza por tener en operación las componentes de SIARDA sobre un distrito hidrométrico, es decir, se conocen las condiciones reales del flujo transitorio mediante los sensores de presión y gasto instalados en los puntos de control de la red (módulo de monitoreo), así como de las condiciones teóricas de este flujo (sin fugas) proporcionadas por el módulo del modelo numérico. Asimismo, se conocen todas las características físicas de la red de distribución, su funcionamiento hidráulico y las causas que originan rupturas en las tuberías en ese distrito (módulo del SIG).

Después se realiza el intercambio de información entre los módulos de SIARDA, para determinar la existencia de fugas en los tramos de las tuberías bajo el control de los sensores de medición. Los sensores miden diariamente el flujo transitorio (por un periodo de 20 minutos y a una frecuencia de 100 mediciones/segundo) durante las horas de mínima demanda de agua por los usuarios, por ejemplo, 3:00 a 3:20 horas. Esta información es transmitida a los módulos del modelo numérico y SIG. Los datos de presión y/o gasto en la entrada y salida del distrito hidrométrico son utilizados por el modelo numérico como condiciones de frontera para simular la presión y gasto esperado en el interior del distrito si no existieran fugas. Los resultados del modelo numérico en los puntos de la red donde se instalaron sensores son transferidos directamente por el modelo al módulo del SIG. Este módulo compara los datos reales (sensores) y teóricos (modelo) del flujo transitorio para determinar la existencia de fugas en los puntos de medición de la red, por ejemplo, cuando las magnitudes de las presiones y/o gastos teóricos son significativamente mayores que las de los sensores.

Por último, SIARDA determina la localización y causas más probables de las fugas en los tramos de las tuberías que están bajo el control del sensor de medición en el que se determinó la existencia de fugas. Para ello, el modelo numérico realiza los cálculos del problema inverso y determina la localización teórica más probable de la fuga. Esta información es enviada al SIG para completar su capa de riesgos de fuga. Con base en todas las capas

que componen la de riesgo (esfuerzos por fallas y fracturas, carga de tráfico, corrosión del suelo, antigüedad de las tuberías, golpe de ariete y problema inverso), el SIG determina la localización y la causa más probable de la fuga.

El problema inverso consiste esencialmente en el ajuste de los parámetros ( $a_1, a_2, a_3, \dots$ ) del modelo (*e.g.* diámetro, espesor, rugosidad, coeficiente de fricción, elasticidad de los tubos) con las mediciones de la carga hidráulica ( $H^m$ ). En condiciones de óptimo funcionamiento hidráulico de la red y con los parámetros calibrados del modelo, la carga hidráulica calculada por el modelo ( $H$ ) debe ser igual a la carga hidráulica medida  $H^m$  en cualquier punto  $i$  de la red. Cuando no se tiene un funcionamiento óptimo de la red, sin embargo, se genera un error ( $E$ ) en las cargas, por

ejemplo, error normalizado  $E = \frac{H^m - H}{H^m}$ . Esta diferencia puede

entonces ser debida al desajuste de los parámetros del modelo, *i.e.*,  $E = E(a_1, a_2, a_3, \dots)$ , pero también a las fugas en la red, cuya área de orificio en los tubos puede considerarse como un parámetro más del modelo. Como se describe en Chen (1995), la estimación de  $E$  en cada punto de medición  $i$ , a primer orden de aproximación, puede ser obtenido mediante su expansión en series de Taylor alrededor de parámetros óptimos ( $a^{0_1}, a^{0_2}, a^{0_3}, \dots$ ):

$$E_i(a_j^0 + \Delta a_j) = E_i(a_j^0) + \sum_{j=1}^M \frac{\partial E_i}{\partial a_j} (a_j - a_j^0) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

donde  $j$  son el número de parámetros del modelo y  $M$  el número total de puntos de medición  $i$  en la red.

Ahora bien, cuando se logre nuevamente un funcionamiento óptimo de la red, *i.e.*, cuando se vuelvan a calibrar los parámetros del modelo (incluidas ahora las fugas), obtendremos que  $E_i(a_j^0 + \Delta a_j) = 0$ , por lo que la ecuación (2) se convierte en el siguiente sistema de  $M$  ecuaciones.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial a_1} & \frac{\partial E_1}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial E_1}{\partial a_N} \\ \frac{\partial E_2}{\partial a_1} & \frac{\partial E_2}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial E_2}{\partial a_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial E_M}{\partial a_1} & \frac{\partial E_M}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial E_M}{\partial a_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (a_1 - a_1^0) \\ (a_2 - a_2^0) \\ \vdots \\ (a_N - a_N^0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{H_1^m - H_1}{H_1^m} \\ \frac{H_2^m - H_2}{H_2^m} \\ \vdots \\ \frac{H_M^m - H_M}{H_M^m} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Al resolver el sistema de ecuaciones (3) se obtienen los parámetros ( $a_1, a_2, a_3, \dots$ ) del modelo (*e.g.* diámetro, espesor, rugosidad, coeficiente de fricción, elasticidad de los tubos, área de orificios de fugas en los tubos). Ahora bien, si el área de orificios de fugas en los tubos se parametriza en términos de distancia, a partir del inicio de los tubos, se tiene la solución para la localización de la fuga en la red.

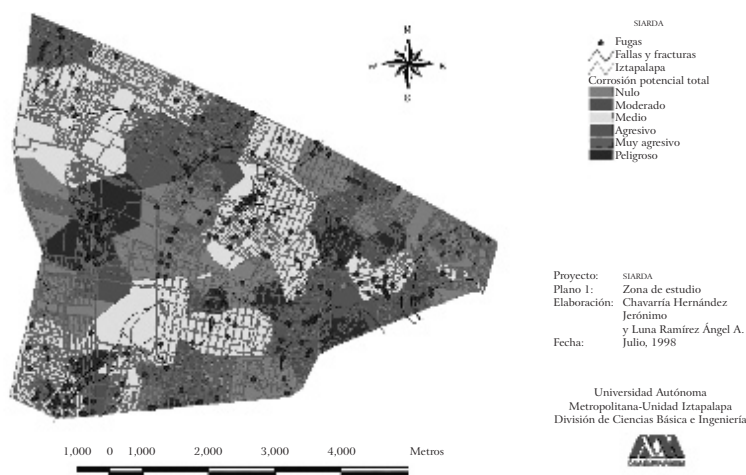
## CASOS DE APLICACIÓN

SIARDA se ha aplicado en casos reales de redes de distribución de agua de la Delegación Iztapalapa (Quiñonez-Piñón y Hernández-Cárdenas, 1999) y en casos de redes experimentales en el laboratorio (Téllez-Arrieta *et al.*, 2006). En ambos casos, sin embargo, no se ha tenido la oportunidad de utilizar las tres componentes de SIARDA.

El módulo del SIG se puso en marcha en la red de distribución de agua potable del sector noroeste de la Delegación Iztapalapa (véase mapa). Se incorporó la información del catastro técnico de la red y la capa de riesgo de fugas (causas que originan las fugas). Con la finalidad de verificar el funcionamiento de este módulo para la detección de fugas, se procedió a ubicar fugas no visibles reparadas. Como se observa en el mapa, el resultado indicó que la fugas principalmente se alinean con las fallas y fracturas del terreno; en segundo lugar, las fugas se presentan en los sitios de alta corrosión del suelo.



## ANÁLISIS DE DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA POTABLE



Por otra parte, los módulos de monitoreo y del modelo numérico se realizaron para una red de dos secciones paralelas de siete tubos, bajo condiciones controladas de carga y flujo. Los resultados mostraron que estos módulos fueron de resolución lenta, sobre todo la parte inversa del modelo numérico, pero la detección de fugas inducidas fue de 80%. La detección de las fugas no fue en tiempo real, debido a las características del microcontrolador, pero esto no es relevante. En relación con la memoria de este mismo sistema, no existió saturación, debido a que se tiene la información relevante del flujo, y se desecha la que ya se ha calculado.

## CONCLUSIONES

SE CUENTA con un sistema de vanguardia para la detección de fugas no visibles en redes secundarias de agua potable (SIARDA). Los casos de aplicación indican que SIARDA promete ser una buena alternativa para reducir el tiempo y costo en la localización de fugas no visibles.

## BIBLIOGRAFÍA

- CHAUDHRY, M.H. (1993), "Transient analysis of water supply networks", en E. Cabrera y F. Martínez (eds.), *Water supply systems state of the art and future trends*, Computational Mechanics Publications, pp. 199-210.
- CHEN, L.C. (1995), *Pipe network transient analysis-the forward and inverse problems.*, Ph. D. Dissertation, Faculty of the Graduate School, Cornell University.
- CONAGUA (2007), *Estadísticas del agua en México, 2007*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- FOX, J.A. (1984), *Hydraulic analysis of unsteady flow in pipe networks*, Mac-Millan Press LTD, 216 pp.
- GÓMEZ-REYES, E. y J.L. Arredondo-Figueroa (1999), *Reporte del Proyecto Sistema de Información Activo de Redes de Agua (SIARDA)*, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.
- KARNEY, B.W. y D. McInnis (1992), "Efficient calculation of transient flow in simple pipe networks", *Journal of Hydraulic Engineering*, núm. 7, vol. 118, pp. 1014-1029.
- MCINNIS, D. y B.W. Karney (1995), "Transients in distribution networks: field tests and demand models", *Journal of Hydraulic Engineering*, núm. 3, vol. 121, pp. 218-231.
- MOTOROLA (1992), 68HC11, *Microcontroladores handbook*.
- QUIÑONEZ-PIÑÓN, R. y G. Hernández-Cárdenas (1999), *Sistema de Información Geográfico. Reporte del Proyecto SIARDA*, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.
- SARH (1981), *Plan Nacional Hidráulico 1981*, Comisión Nacional del Plan Hidráulico, Secretaría de Agricultura y de Recursos Hidráulicos.
- TÉLLEZ-ARRIETA, V.H., I. Sánchez-Gutiérrez y E. Gómez-Reyes (2006), "Sistema para la valoración de un modelo para la detección de fugas en redes de agua potable", *Congreso de Instrumentación SOMI XXI*, Ensenada, B.C., del 22 al 25 de octubre, 146-VTA.

JOSÉ LUIS NAVA,\*  
EDGAR BUTRÓN\*\*  
E IGNACIO GONZÁLEZ\*

*Electroincineración del colorante textil índigo  
en un reactor electroquímico prepiloto FM01-LC  
usando electrodos tridimensionales  
de diamante dopados con boro*

RESUMEN

EN EL PRESENTE TRABAJO se muestra un estudio del proceso de incineración electroquímica de una solución que simula un efluente generado por la industria textil, que contiene al colorante azul índigo, empleando electrodos tridimensionales de diamante dopados con boro (BDD, por sus siglas en inglés). Se muestran electrólisis a densidad de corriente constante de  $100 \text{ A m}^{-2}$  en un reactor electroquímico prepiloto FM01-LC, empleando electrodos tridimensionales BDD, a diferentes números de  $Re$ , comprendidos entre  $58 \leq Re \leq 174$ . Las electroincineraciones alcanzaron mineralizaciones de hasta  $\sim 98\%$ , removiendo el color  $100\%$ , con eficiencias de corriente de mineralización de  $\sim 98\%$ , y un consumo de energía por electrólisis de  $7 \text{ kW-h m}^{-3}$ , dando costos de  $14 \text{ pesos m}^{-3}$  (en moneda nacional). Estos resultados abren una expectativa muy interesante, debido a que los efluentes generados por la industria textil pueden ser tratados por un proceso de incineración electroquímica.

\* Profesores-investigadores. Departamento de Química. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, + (52) 55 5804 4600 ext. 2684 [jlnm@xanum.uam.mx, igm@xanum.uam.mx].

\*\* Tesis en licenciatura en ingeniería química. Egresado de la licenciatura en ingeniería química de la Facultad de Estudios Superiores-Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México [edbuva@yahoo.com.mx].

## INTRODUCCIÓN

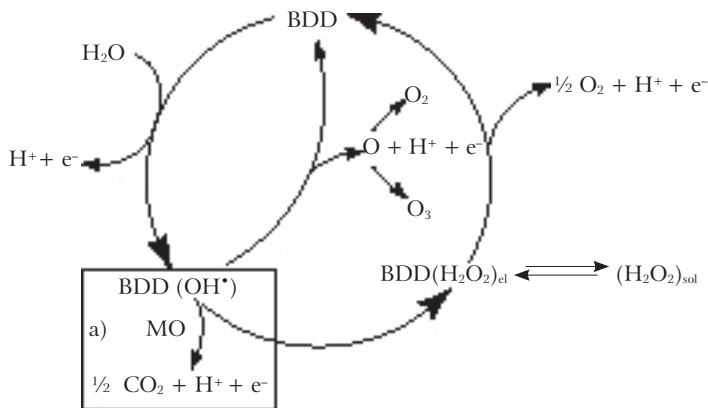
LA INDUSTRIA textil es una de las más contaminantes en términos de volumen, color y complejidad de los efluentes de descarga. Los efluentes usualmente contienen colorantes con una estructura química compleja y un alto peso molecular; son altamente solubles en agua y persistentes, una vez descargados en el medio ambiente (Cañizares *et al.*, 2006, Dogan y Turkdemir, 2005).

Se calcula que en la industria textil, de los colorantes que se usan durante el proceso de teñido, del 10 al 20% se tiran a los cuerpos naturales o drenajes municipales sin tratamiento previo. Muchos de estos colorantes son formadores potenciales de aminas aromáticas tóxicas, que además son resistentes a la luz (Wong y Yu, 1999).

Los métodos tradicionales de tratamiento de aguas residuales textiles consisten en la coagulación química y el tratamiento biológico, seguido por la adsorción con carbón activado (Rajkumar *et al.*, 2007, Zille *et al.*, 2004). Sin embargo, estos procedimientos resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requeridos por las normas ambientales para ser vertidos al drenaje municipal o para el uso posterior de esta agua.

Por esta razón, algunos investigadores han estudiado métodos de oxidación alternativos, como la ozonización, oxidación fotocatalítica y la oxidación electroquímica (Cañizares *et al.*, 2006). Recientemente, los electrodos de diamante dopados con boro (BDD) han mostrado su conveniencia en la mineralización de diversos compuestos orgánicos (Gandini *et al.*, 2000, Michaud *et al.*, 2003, Zhi *et al.*, 2003). La mineralización ocurre mediante la reacción del compuesto orgánico con los radicales hidroxilo ( $\text{OH}^\bullet$ ), electrogenerados por la descarga del agua sobre la superficie de BDD. La generación de ( $\text{OH}^\bullet$ ) debe ser controlada en ciertos intervalos de potencial (E) y densidad de corriente (J), debido a que el agua puede oxidarse para formar  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{O}_3$ , que son oxidantes menos fuertes que el  $\text{OH}^\bullet$  (figura 1) (Nava *et al.*, 2007).

FIGURA 1  
ESQUEMA DEL MECANISMO DE OXIDACIÓN DEL AGUA.  
ETAPA EN LA QUE SE LLEVA A CABO LA MINERALIZACIÓN  
DE LA MATERIA ORGÁNICA (MO), SOBRE UN  
ELECTRODO DE BDD



Fuente: Michaud *et al.*, 2003.

El presente estudio analiza la incineración del colorante azul índigo en un reactor electroquímico FM01-LC, usando electrodos BDD tridimensionales a diferentes condiciones hidrodinámicas.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

### *Soluciones*

Todas las soluciones fueron preparadas con reactivos grado analítico y agua desionizada, con  $18 \text{ m}\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$  de resistividad, obtenida de un sistema Mill-Q<sup>TM</sup>. Se prepararon cuatro soluciones modelo, que simulan un efluente textil de una industria del lavado de la mezclilla, a diferentes concentraciones (44, 143, 243 y 536 mg/L DQO), con una conductividad de  $5.78 \text{ mS cm}^{-1}$  en 0.05 M de NaCl y pH = 6.34.

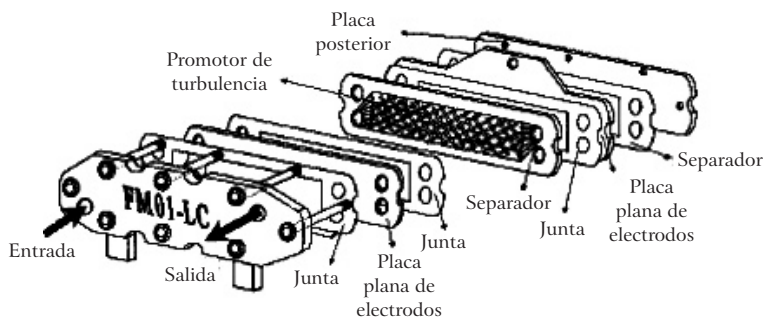
## Equipos

Un potencióstato galvanostato EG&G modelo PAR 273 y un *software* M270 fue usado para todos los experimentos de cronopotenciometría y cronoamperometría. Para el análisis de la demanda química de oxígeno (DQO) se utilizó un baño seco Lab Line Model 2008 y un espectrofotómetro Genesys 20.

## Experimentos de electrólisis

Se utilizó una celda tipo filtro-prensa FM01-LC (figura 2), no dividida. Se colocaron en la celda tres mallas de BDD, con un área disponible de  $444\text{ cm}^2$ , las cuales fueron utilizadas como electrodo de trabajo, el contraelectrodo fue una placa de titanio platiniizada con un área de  $64\text{ cm}^2$ . En el cuadro se describen los parámetros de la celda.

FIGURA 2  
VISTA DE LA CELDA ELECTROLÍTICA FM01-LC  
DE LABORATORIO EN MODO NO DIVIDIDO,  
PARA ELECTRODOS BDD 3D



Fuente: M. Griffiths, C. Ponce de León y F.C. Wals, *AIChE J.*, 2005.

En la figura 3 se muestra el circuito eléctrico e hidráulico adaptado al reactor FM01-LC. El electrolito se colocó en un recipiente de policarbonato de un litro de volumen, acoplado a una

bomba magnética de 1/8 hp March MFG, modelo TE-5-MD-HC. La velocidad del flujo fue medida con un rotámetro variable de vidrio Cole Palmer, modelo 0504 y mediante una válvula de PVC se controló el flujo. El circuito del electrolito (figura 3) fue construido con tubo Master Flex, C-Flex 6424-16, de 0.5 pulgadas de diámetro. Las válvulas y todos los conectores fueron hechos de PVC.

*Metodología para incineración electroquímica  
del colorante azul índigo, en una celda electroquímica  
FM01-LC tipo filtro prensa usando electrodos BDD 3D*

La incineración electroquímica del azul de índigo fue llevada a cabo mediante una celda tipo filtro-prensa FM01-LC (figura 2), aplicando una densidad de corriente de  $100 \text{ A m}^{-2}$ , determinada en estudios de microelectrólisis (no mostrados en este trabajo), a diferentes números de Re.

DIMENSIONES DE LA CELDA FM01-LC  
Y DETALLES EXPERIMENTALES

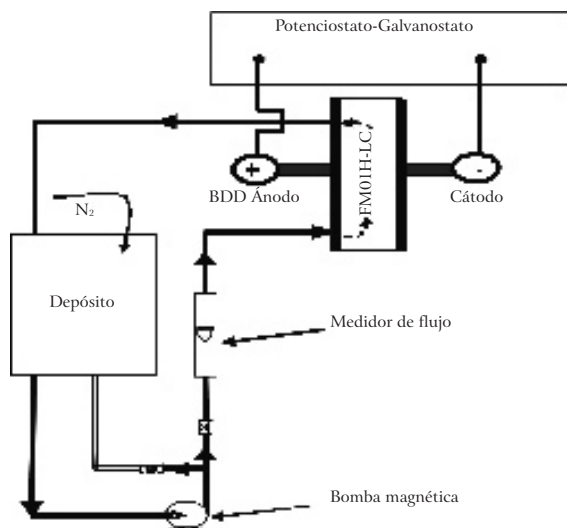
---

Longitud del electrodo, L	16 cm
Altura del electrodo, B	4.1cm
Espaciamiento de electrodo, S	0.6 cm
Área del electrodo, A	444 cm <sup>2</sup>
Esfericidad	0.492
Diámetro de partícula	0.20 cm
Porosidad	0.62

---

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3  
CIRCUITO ELÉCTRICO E HIDRÁULICO ACOPLADO  
A LA CELDA FM01-LC



Fuente: E. Butrón, M.E. Juárez, M. Solís, M. Teutli, I. González y J.L. Nava, *Electrochemical Acta*, vol. 52, núm. 1, pp. 6888-6894.

Las electrólisis fueron realizadas usando una concentración de 536.22 mg L<sup>-1</sup> DQO ( $1.08 \times 10^{-3}$  M de colorante). Durante la electrólisis se tomaron muestras a diferentes tiempos, para el análisis de la DQO. Los valores de la DQO fueron determinados por el método de titulación con dicromato a reflujo cerrado (APHA, 1995).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Incineración electroquímica del colorante azul índigo, en una celda electroquímica FM01-LC tipo filtro prensa usando electrodos BDD 3D*

En la gráfica 1, se muestra la incineración del colorante azul índigo en el reactor FM01-LC, a diferentes Reynolds, observándose

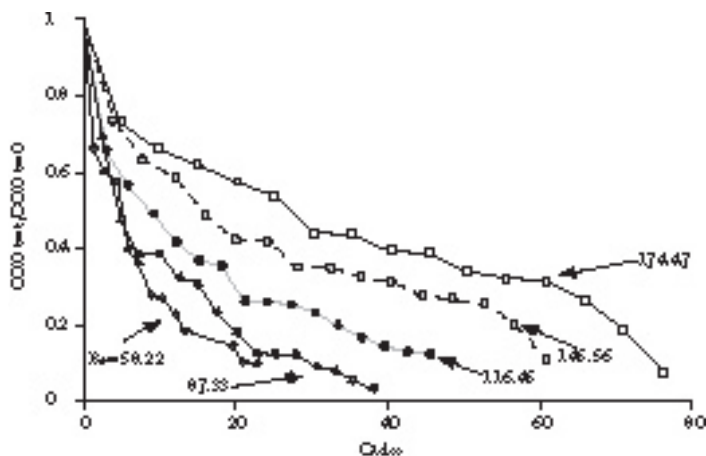


que, conforme el número de ciclos aumenta, la DQO disminuye. Esto está asociado a la mineralización del colorante vía radical hidroxilo y al tiempo de permanencia del colorante dentro de la FM01-LC. Por otra parte, al aumentar el Re, la mineralización del colorante aumenta, esto indica que la convección favorece la electroincineración del efluente.

### GRÁFICA 1

#### DQO NORMALIZADA DURANTE LA ELECTRÓLISIS DEL AZUL ÍNDIGO

536 PPM DQO EN 0.05 M DE NaCl, pH = 6.3, T = 298 °K.  
DENSIDAD DE CORRIENTE APLICADA AL REACTOR FM01-LC,  
I = 100 A m<sup>-2</sup>, A DIFERENTES NÚMEROS DE REYNOLDS



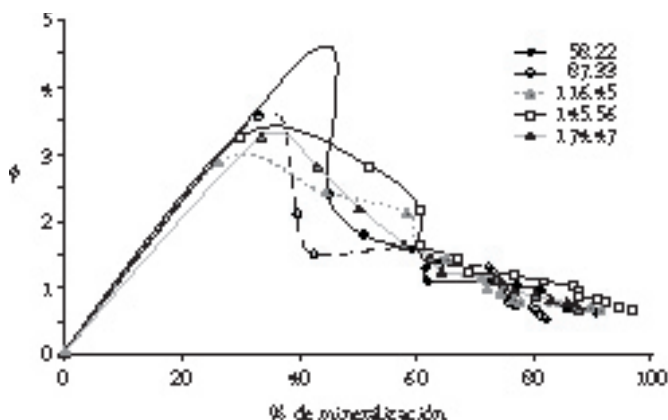
Fuente: Elaboración propia.

El desempeño de la electrólisis se determinó a partir de los valores obtenidos de DQO, para cada una de las electrólisis realizadas a las condiciones hidrodinámicas propuestas. Este desempeño fue calculado usando la ecuación 1 y graficada contra el porcentaje de mineralización (gráfica 2).

$$\phi = 4 * F * V * \left( \frac{DQO_{t=0} - DQO_{t=t}}{Q_t} \right) \quad (1)$$

Donde  $F$  es la constante de Faraday,  $DQO_{t=0}$  y  $DQO_{t=t}$ , es la demanda química de oxígeno a un tiempo inicial y a un tiempo  $t$  en ( $\text{mol O}_2 \text{ L}^{-1}$ ),  $Q_t$  es la carga total empleada en la electrólisis y  $V$  el volumen del electrolito.

GRÁFICA 2  
EFICIENCIA DE CORRIENTE DURANTE LA ELECTRÓLISIS  
DEL AZUL ÍNDIGO A DIFERENTES  $Re$



Fuente: Elaboración propia.

Del análisis de la figura 5, se observa que conforme aumenta la mineralización del colorante, disminuye la eficiencia de corriente, debido al agotamiento de la materia orgánica.

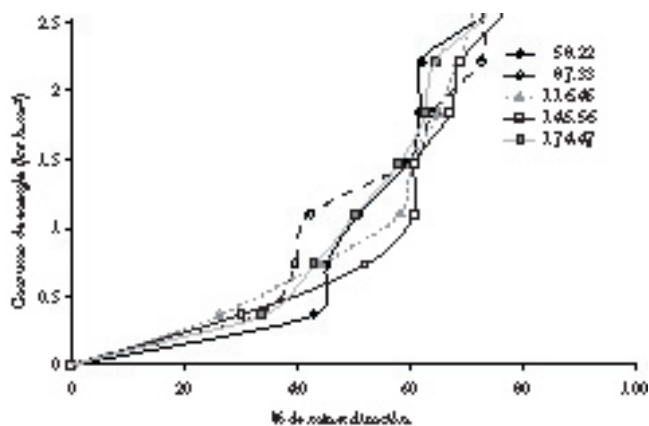
El consumo de energía es un parámetro de suma importancia para los tratamientos electroquímicos, ya que influye de manera directa en la decisión de poner en práctica o no, estas tecnologías. En la gráfica 3 se muestran los consumos de energía de la mineralización calculados por medio de la ecuación 2.

$$E_{consumo} = \frac{4 * F * E_{cell} * \Delta DQO}{\phi * 3606} \quad (2)$$

Donde  $E_{\text{Cell}}$  es el potencial de celda en V, 3606 es un factor de conversión para que el  $E_{\text{consumo}}$  se obtenga en unidades de KW-h  $\text{m}^{-3}$ .

GRÁFICA 3

### CONSUMO DE ENERGÍA DURANTE LA INCINERACIÓN ELECTROQUÍMICA DEL AZUL ÍNDIGO A DIFERENTES $Re$



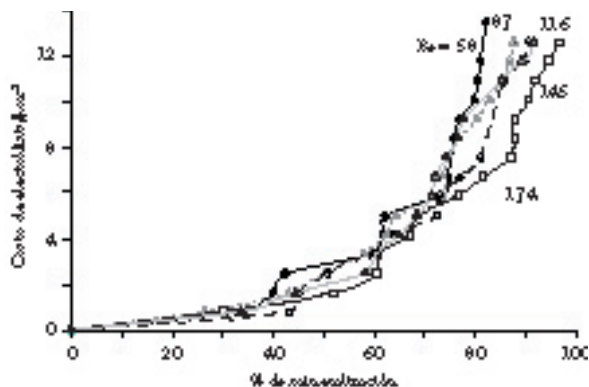
Fuente: Elaboración propia.

Del análisis de la gráfica 3 se obtienen valores muy similares para el consumo de energía por electrólisis de la electroincineración del índigo. Considerando que en la Ciudad de México el costo del KW-h es de dos pesos, se ilustró el costo de la electrólisis en la gráfica 4, donde se observa que los costos no exceden los 14 pesos.

De acuerdo con los costos observados para la mineralización del colorante, se puede considerar este proceso como una alternativa para el tratamiento de este tipo de efluentes y más económico que cuando se utilizan electrodos BDD bidimensionales (Butrón *et al.*, 2007).

## GRÁFICA 4

## COSTO DE ELECTRO-INCINERACIÓN COMO FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE MINERALIZACIÓN DEL COLORANTE AZUL DE ÍNDIGO



Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

EL USO de este tipo de tecnologías basadas en los estudios de DQO es una posible solución a los problemas de contaminación que genera la industria textil, ya que por medio de estas técnicas, se puede obtener hasta 95% de mineralización de compuestos orgánicos llevándolos hasta  $\text{CO}_2$ , vía oxidación indirecta por medio de radicales  $\text{OH}^\bullet$ , electrogenerados sobre el electrodo de BDD mediante la oxidación del agua. Por otro lado, los costos de tratamiento son relativamente bajos.

## BIBLIOGRAFÍA

- APHA, AWWA, WPCF (1995), *Standard methods for the examination of water and wastewater*, Nueva York.
- BUTRÓN, E., E.M. Juárez, M. Solís, M. Teutle, I. González, J.L. Nava (2007), "Electrochemical incineration of indigo textile dye in filter press type FM0I-LC electrochemical cell using BDD electrodes", *Electrochemical Acta*, vol. 52, núm. 24, pp. 6888-6894.

- CAÑIZARES, P., A. Gadri, J. Lobato, B. Nasr, M.A. Rodrigo y C. Sáez (2006), "Electrochemical oxidation of azoic dyes with conductive-diamond anodes", *Ind. Eng. Chem. Res.*, núm. 10, vol. 45, pp. 3468-3473.
- DOGAN, D. y H. Turkdemir (2005), "Electrochemical oxidation of textile dye indigo", *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, núm. 80, vol. 80, pp. 916-923.
- GANDINI, D., E. Mahe y Ch. Comninellis (2000), "Oxidation of carboxylic acids at boron-doped diamond electrodes for wastewater treatment", *Journal of applied electrochemistry*, núm. 12, vol. 30, pp. 1345-1350.
- MICHAUD, P.A., M. Panizza, L. Ouattara, T. Diaco, G. Foti y Ch. Comninellis (2003), "Electrochemical oxidation of water on synthetic boron-doped diamond thin film anodes", *Journal of applied electrochemistry*, núm. 2, vol. 33, pp. 151-154.
- NAVA, J.L., F. Núñez e I. González (2007), "Electrochemical incineration of p-cresol and o-cresol in the filter-press-type FM01-LC electrochemical cell using BDD electrodes in sulfate media at pH 0", *Electrochemical Acta*, vol. 52, núm. 9, pp. 3229-3235.
- RAJKUMAR, D., B.J. Song y J.G. Kim (2007), "Electrochemical degradation of Reactive Blue 19 in chloride medium for the treatment of textile dyeing wastewater with identification of intermediate compounds", *Dyes and pigments*, núm. 1, vol. 72, pp. 1-7.
- WONG, Y. y J. Yu (1999), "Laccase-catalyzed decolorization of synthetic dyes", *Water Res.*, vol. 33, núm. 16, pp. 3512-3520.
- ZHI, J.F., H.B. Wang, T. Nakashima, T.N. Rao y A. Fujishima (2003), "Electrochemical incineration of organic pollutants on boron-doped diamond electrode. Evidence for direct electrochemical oxidation pathway", *J. phys. Chem.*, vol. 107, núm. 48, pp. 13389-13395.
- ZILLE, A., P. Ramalho, T. Tzanov, R. Millward, V. Aires, M.E. Cardoso, M.T. Ramalho, G. M. Gúbitz y A. Cavaco-Paulo (2004), "Predicting dye biodegradation from redox potencial", *Biotechnol Prog.*, vol. 20, núm. 5, pp. 1588-1592.



FERNANDO F. RIVERA\*

IGNACIO GONZÁLEZ\*

Y JOSÉ L. NAVA\*

## *Aplicación de un reactor con electrodo de cilindro rotatorio (RCE) al tratamiento de un enjuague de cobrizado generado por una industria de cromado de plásticos*

### INTRODUCCIÓN

LAS AGUAS CON ALTAS concentraciones de metales son producidas en procesos relacionados con las industrias de la galvanoplastia, cromado de plásticos, metal-mecánica, entre otras. Los efluentes generados por este tipo de industrias provienen de los enjuagues que se realizan en estos procesos.

El tratamiento fisicoquímico tradicional que emplean estas industrias consiste en la generación de hidróxidos metálicos, que posteriormente tienen que ser confinados. La confinación de los residuos sólidos tiene un fuerte impacto ambiental; por otro lado, los efluentes tratados no tienen la calidad para ser vertidos al drenaje municipal, debido a que los límites de solubilidad de diversos metales en muchas ocasiones se encuentran por encima de los límites permitidos por las normas ambientales.

Por lo antes mencionado, las tecnologías electroquímicas han llamado la atención, debido a que permiten recuperar al metal en su forma más valiosa, estado de oxidación cero, destacando que estas tecnologías no requieren de la adición de químicos, y por lo tanto no suelen generar subproductos que después tengan que ser tratados o confinados (Walsh, 2001; Ragnini *et al.*, 2000; Pletcher y Walsh, 1990; Fornari y Abbruzzese, 1999). Además, los metales electrorrecuperados generan un valor agregado, por lo que

\* Profesores-investigadores del Departamento de Química, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.

este tipo de tecnologías pueden ser consideradas como un proceso de beneficio.

La selección apropiada del reactor electroquímico a emplear debe considerar la concentración de los metales en solución, así como la conductividad del electrolito y el pH. El reactor electroquímico con electrodo de cilindro rotatorio (RCE), es una de las tecnologías más empleadas para la remoción de metales, debido a que permite remociones de metales desde 10,000 hasta 10 ppm (Pletcher y Walsh, 1990; Walsh, 2001). Por ejemplo, ha sido usado para el reciclaje de zinc proveniente de soluciones obtenidas de procesos de minería (St-Pierre *et al.*, 1996) la electrodeposición de estaño y cadmio (Bazan y Bisang, 2004; Grau y Bisang, 2002; Grau y Bisang, 2007), la remoción de plata de los procesos fotográficos (Wang-Kyu *et al.*, 2000) la remoción de cobre en efluentes (Nava *et al.*, 2001; Masse, *et al.*, 1995).

El RCE se opera generalmente en condiciones tales que el proceso catódico se encuentre limitado por la transferencia de masa. El control por transporte de masa se logra mediante la velocidad angular originada por la rotación del electrodo y mediante la aplicación de una densidad de corriente límite adecuada al electrodo (Low *et al.*, 2005; Gabe *et al.*, 1998). La manera más conveniente de caracterizar la transferencia de masa es por medio de correlaciones empíricas adimensionales del tipo (Rivera y Nava, 2008):

$$\text{Sh} = 0.014 \text{ Re}^{0.91} \text{ Sc}^{0.356} \quad (1)$$

donde el número de Sherwood (Sh), relaciona el transporte de masa convectivo y difusivo, el Reynolds (Re) la hidrodinámica, y el Schmidt (Sc), las propiedades del electrolito. El coeficiente y el exponente del Reynolds son determinados experimentalmente (Rivera y Nava, 2008). Es importante mencionar que el coeficiente de la ecuación (1) se encuentra relacionado con la forma del electrodo, la geometría de la celda, y con las dimensiones de la misma, mientras que el exponente del Reynolds se encuentra relacionado con la hidrodinámica (Low *et al.*, 2005; Gabe *et al.*, 1998; Rivera y Nava, 2008).



En este trabajo se muestra la aplicación de un RCE a nivel laboratorio para la remoción de cobre contenido en un enjuague generado por una industria de cromado de plásticos, particularmente de un enjuague de cobrizado. Las electrólisis fueron llevadas a cabo en modo galvanostático a diferentes Reynolds, empleando una correlación adimensional informada en la literatura.

## EXPERIMENTAL

EN ESTE trabajo se utilizó un enjuague residual generado por una industria de cromado de plásticos, la cual en su mayoría tiene disuelto cobre, que presentó las siguientes concentraciones: Cu 866 mg L<sup>-1</sup>, Ni 33 mg L<sup>-1</sup>, Cr 5 mg L<sup>-1</sup> y Fe 1.5 mg L<sup>-1</sup> a pH = 1.86 y conductividad de 10 mS cm<sup>-1</sup>.

### *Equipo*

Para los experimentos de electrólisis, se empleó un potenciostato-galvanostato EG&G modelo PAR 273 y el software M270. A este potenciostato se acopló una fuente de poder Kepco<sup>TM</sup> de 10 A y 20 V de capacidad. Se usó un espectrofotómetro de absorción atómica Varian<sup>TM</sup> Modelo 220 FS, para las determinaciones de los metales en solución. Para los microanálisis de los depósitos se utilizó un microscopio electrónico de barrido JEOL<sup>TM</sup>, modelo JSM-5900LV acoplado a espectrómetro de energía dispersa (EDS) Oxford<sup>TM</sup>, modelo 7274.

### *Reactor con electrodo de cilindro rotatorio (RCE)*

La figura 1 muestra el diagrama de un dispositivo construido para llevar a cabo estudios de laboratorio, que consiste en un reactor de vidrio de 600 ml con baño de temperatura acoplado. Un cilindro de acero inoxidable 316 con un diámetro de 3.8 cm y una longitud de 11 cm fue usado como cátodo. Como ánodos se insertaron seis placas de DSA (ánodos dimensionalmente estables de

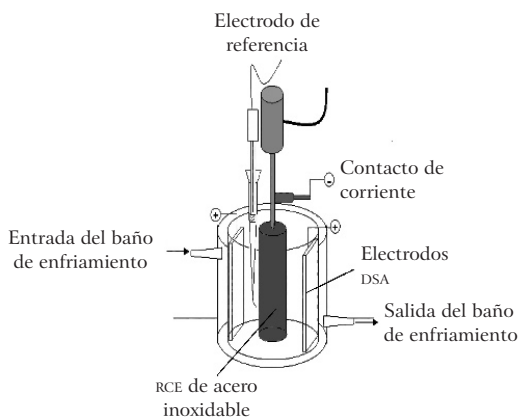
$\text{RuO}_2/\text{TiO}_2$ ) con dimensiones de 2 cm de ancho  $\times$  13 cm de largo y espesor de 0.3 cm cada uno. En el cuadro 1 se muestran los parámetros del RCE utilizados en este trabajo.

CUADRO 1  
PARÁMETROS DEL RCE Y PROPIEDADES DEL ELECTROLITO

Volumen de reacción, $V_R$	350 cm <sup>3</sup>
Diámetro del RCE, d	3.8 cm
Longitud del RCE, L	11 cm
Área del RCE, $A_{RCE}$ (En contacto con el electrolito)	80 cm <sup>2</sup>
Longitud y ancho de las placas usadas contra electrodos (colocadas en las paredes del reactor)	13 $\times$ 2 cm
Espacio interelectródico	1.75 cm
Área del contraelectrodo, $A_{CE}$ , (seis placas, en contacto con la solución)	84 cm <sup>2</sup>
Coefficiente de difusión, D	$5.94 \times 10^{-6}$ cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Viscosidad cinemática, $\nu$	0.01 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 1  
ESQUEMA DEL RCE



Fuente: FF. Rivera, I. González, J.L. Nava, Environm. Technol, 2008.

## Metodología

La determinación de la densidad de corriente límite fue obtenida por el análisis de las ecuaciones (1), (2) y (3), para obtener la ecuación (4). Es importante mencionar que la correlación descrita por la ecuación (4) fue determinada experimentalmente durante el depósito de cobre, en un trabajo previo desarrollado por nuestro grupo (Rivera y Nava, 2008).

$$Sh = \frac{K_m d}{D} \quad (2)$$

$$K_m = \frac{J_L}{ZFC} \quad (3)$$

$$J_L = \frac{ZFDC}{d} 0.014 Re^{0.6913} Sc^{0.356} \quad (4)$$

donde  $J_L$  es la densidad de corriente límite en  $\text{mA cm}^{-2}$ ,  $K_m$  el coeficiente de transferencia de masa en  $\text{cm s}^{-1}$ ,  $d$  el diámetro del cilindro rotatorio en  $\text{cm}$ ,  $D$  el coeficiente de difusión de la especie electroactiva en  $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ,  $Z$  el número de electrones intercambiados en la reacción electroquímica,  $F$  la constante de Faraday ( $96,485 \text{ Coul. mol}^{-1}$ ), y  $C$  la concentración de la especie electroactiva en el seno de la solución en  $\text{mol cm}^{-3}$ .

En el cuadro 2 se muestran los valores de la densidad de corriente límite evaluados a partir de la ecuación (4), tomando los valores de los parámetros y propiedades del electrolito mostrados en el cuadro 1, para tres diferentes  $Re$  mostrados en el mismo, que fueron aplicados al RCE para la remoción por electrólisis del cobre contenido en el enjuague de cobrizado.

CUADRO 2  
DENSIDADES DE CORRIENTE CALCULADAS  
EN FUNCIÓN DEL REYNOLDS

$Re$	$J_L / \text{mA cm}^{-2}$
22,682	7.7
52,925	17
83,183	25

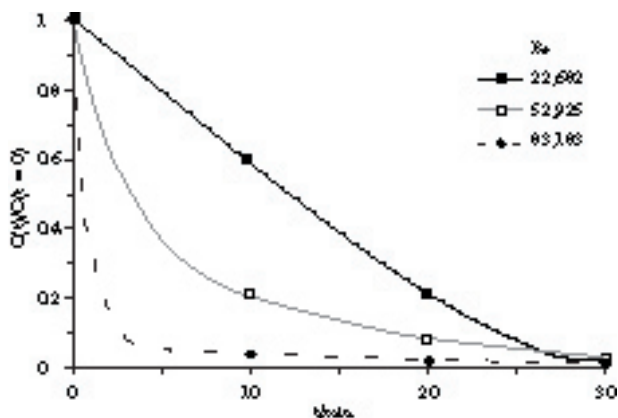
Fuente: Elaboración propia.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

LA GRÁFICA 1, muestra el decaimiento normalizado de la concentración de Cu(II) como función del tiempo de electrólisis a los tres diferentes Reynolds mostrados en el cuadro 2.

GRÁFICA 1

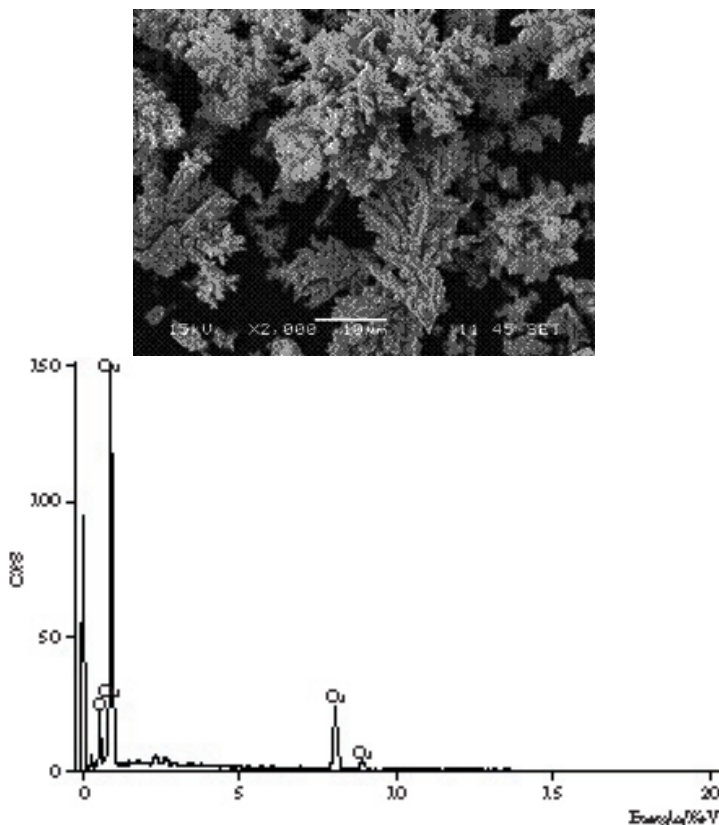
DECAIMIENTO NORMALIZADO DE LA CONCENTRACIÓN  
DE COBRE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE ELECTRÓLISIS  
EN EL RCE. LA DENSIDAD DE CORRIENTE APLICADA  
FUE DIFERENTE PARA CADA  $Re$ : 22,682  
(7.7  $\text{mA cm}^{-2}$ ), 52,595 (17  $\text{mA cm}^{-2}$ ) Y 83,183 (25  $\text{mA cm}^{-2}$ )



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 2

MICROANÁLISIS POR SEM-EDX DEL DEPÓSITO DE COBRE  
OBTENIDO EN EL RCE AL FINAL DE LAS ELECTRÓLISIS  
a  $Re = 52,925$ , (b) Espectro de XRD de (a)



Fuente: Elaboración propia.

Del análisis de la gráfica 1, se observa un decaimiento de la concentración de cobre de tipo exponencial como función del tiempo de electrólisis, el cual se hace más pronunciado conforme incrementa el  $Re$ , indicando que el proceso se encuentra limitado por la transferencia de masa. Es importante mencionar que a tales condiciones hidrodinámicas y de densidad de corriente, se generaron

depósitos dendríticos que se desprenden continuamente y cuya imagen de SEM es mostrada en la figura 2(a). Este tipo de depósitos en forma de polvo son generados debido a una microturbulencia interfacial provocada por las condiciones extremas del Reynolds que fueron estudiados en este trabajo y que concuerdan con lo obtenido por Nava *et al.* (2001) y Lowe *et al.* (2005).

Cabe señalar que el decaimiento de la concentración del Cu(II) alcanzó un valor de 13 ppm al final de las electrólisis, destacando que un  $Re = 83,183$  se logra en un tiempo de 10 minutos.

Por otro lado, las concentraciones de Cr, Fe, y Ni en solución (no mostradas en este trabajo) se mantuvieron invariantes para las tres electrólisis, lo cual evidencia que se tiene un depósito selectivo a cobre. Un análisis de los depósitos por EDS, figura 2(b), no evidenció la presencia de cromo, hierro o níquel. El depósito selectivo a cobre es debido a que los potenciales de reducción de Ni se encuentran 500 mV más negativos que los característicos de cobre, mientras que para el Fe y el Cr, es difícil llevar a cabo su reducción en medios ácidos (Walsh, 2001; Pletcher y Walsh, 1990). Cabe señalar que la remoción de todos estos metales estuvo fuera de los objetivos de este trabajo.

La gráfica 2 muestra las eficiencias de corriente obtenidas para las tres electrólisis mostradas en la gráfica 1. Éstas fueron obtenidas mediante la siguiente ecuación (Walsh, 1993):

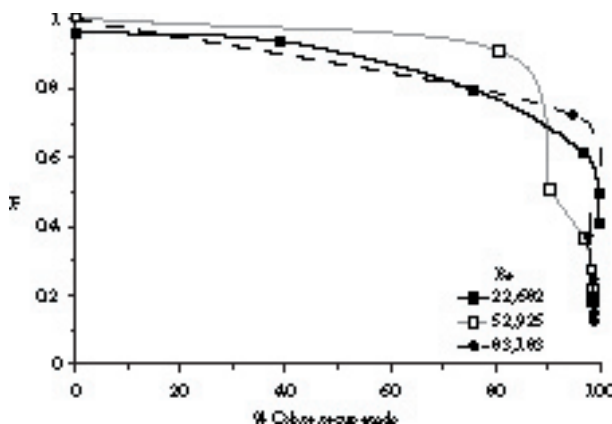
$$\varphi = \frac{zF\Delta C V_r}{Q_t} \quad (5)$$

donde  $z$  es el número de electrones que se transfieren en la reacción electroquímica,  $F$  es la constante de Faraday igual a  $96,480 \text{ C mol}^{-1}$ ,  $\Delta C = (C_{t=0} - C_t)$  en  $\text{mol cm}^{-3}$ ,  $V_r$ , el volumen de la solución en  $\text{cm}^3$ , y  $Q_t$  es la carga total empleada en la electrólisis.

Del análisis de la gráfica 2, se observa una eficiencia de corriente de 90% para 80% de recuperación de cobre para los Reynolds de 22,682 y 83,183, mientras que para el  $Re$  de 52,925, la eficiencia fue mayor a 90%. Por otro lado, para una recuperación mayor a

GRÁFICA 2

EFICIENCIAS DE CORRIENTE EN FUNCIÓN  
DEL PORCENTAJE DE COBRE RECUPERADO  
DURANTE LAS ELECTRÓLISIS MOSTRADAS  
EN LA GRÁFICA 1



Fuente: Elaboración propia.

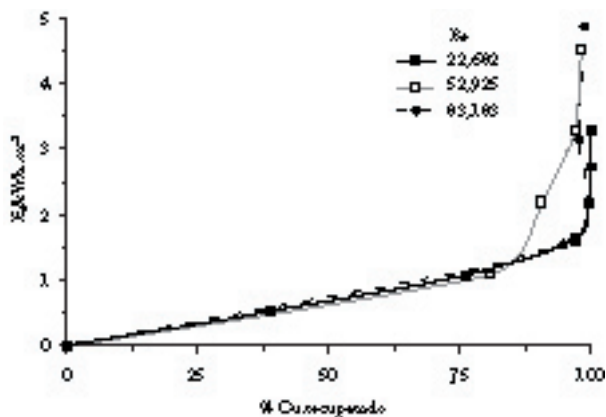
80% de Cu(0), las eficiencias de corriente disminuyen considerablemente. Las eficiencias que se lograron en la primera parte de la recuperación, y particularmente en el  $Re = 52,925$ , son muy altas debido a que las condiciones de transferencia de masa son bastante aceptables y a que están asociadas al uso de contraelectrodos como baffles (Rivera y Nava, 2008). Por otra parte, la disminución abrupta de las eficiencias después de 80% de recuperación está asociada con la reducción del medio.

En la gráfica 3 se muestra el consumo de energía de las electrólisis realizadas como función de la cantidad de cobre recuperado. El consumo de energía fue obtenido por medio de la ecuación (Walsh, 1993):

$$E_{\text{cons}} = \frac{zFE_{\text{cell}}\Delta C(1 \times 10^6)}{\phi 3.6 \times 10^6} \quad (6)$$

donde  $E_{\text{cell}}$  es el potencial de celda en volts.

GRÁFICA 3  
CONSUMO DE ENERGÍA EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE  
DE COBRE RECUPERADO DURANTE LAS ELECTRÓLISIS  
MOSTRADAS EN LA GRÁFICA 1



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 3 se observa hasta 80% de recuperación de cobre. El consumo de energía es similar en todos los Reynolds y se mantiene un valor comprendido entre  $0.5 < E_{\text{cons.}} < 1 \text{ kWh m}^{-3}$ . Posteriormente, a porcentajes de Cu recuperado  $> 99\%$ , el consumo de energía toma valores de  $2 \text{ kWh m}^{-3}$  para los Re de 22,682 y 83,183. Es importante mencionar que los consumos de energía obtenidos en este trabajo son inferiores a los reportados en RCE, por ejemplo, se reportan valores para remoción de cadmio y cobre de  $17.79$  y  $10 \text{ kWh m}^{-3}$ , respectivamente (Grau y Bisang, 2002). Los consumos de energía informados en este trabajo se deben a que en esta comunicación se emplearon ánodos DSA que catalizan la evolución de oxígeno, mientras que en los trabajos citados se emplearon alambres de platino.

Los resultados mostrados en este trabajo indican que el proceso puede aplicarse a la remoción de cobre hasta 90% de recuperación, lo cual permite la reutilización industrial del efluente, con consumos de energía de  $2 \text{ KW m}^{-3}$ .



## CONCLUSIONES

SE ENCONTRÓ que el proceso de remoción de cobre por electrólisis es técnica y económicamente viable, para ser considerado como una alternativa para el tratamiento de los enjuagues generados por la industria galvanoplástica. Con el tratamiento electroquímico, el agua tratada tiene la calidad para ser reutilizada en el mismo proceso de enjuague. Las electro-recuperaciones de cobre permiten remover 90% de Cu(II), con eficiencias de corriente de 90% y un consumo de energía por electrólisis de  $2 \text{ kWh m}^{-3}$ , para los Reynolds de 22,682 y 83,183.

## BIBLIOGRAFÍA

- BAZAN, J.C. y J.M. Bisang (2004), "Electrochemical removal of tin from dilute aqueous sulfate solutions using a rotating cylinder electrode of expanded metal", *J. Appl. Electrochem.*, vol. 34, núm. 5, pp. 501-506.
- FORNARI, P. y C. Abbruzzese (1999), "Copper and nickel selective recovery by electrowinning from electronic and galvanic industrial solutions", *Hydrometallurgy*, vol. 52, núm. 3, pp. 209-222.
- GABE, D.R., G.D. Wilcox, J. González-García y F.C. Walsh (1998), "The rotating cylinder electrode: its continued development and application", *J. Appl. Electrochem.*, vol. 28, núm. 8, pp. 759-780.
- GRAU, J.M. y J.M. Bisang (2002), "Removal of cadmium and production of cadmium powder using a continuous undivided electrochemical reactor with a rotating cylinder electrode", *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 77, núm. 4, pp. 465-472.
- (2007), "Electrochemical removal of cadmium from dilute aqueous solutions using a rotating cylinder electrode of wedge wire screens", *J. Appl. Electrochem.*, vol. 37, núm. 2, pp. 275-282.
- LOW J., C. Ponce de León C. y F.C. Walsh (2005), "The rotating cylinder electrode (RCE) and its application to the electrodeposition of metals", *Aust. J. Chem.*, vol. 58, núm. 4, pp. 246-262.
- MASSE, N., J. St-Pierre y M. Bergeron (1995), "Copper removal from aerated solution containing various metal ions using an undivided rotating cylinder electrode reactor", *J. Appl. Electrochem.*, vol. 25, núm. 4, pp. 340-346.

- NAVA, J.L., E. Sosa, C. Ponce de León, y M.T. Oropeza (2001), "Effectiveness factors in an electrochemical reactor with rotating cylinder electrode for the acid-cupric/copper cathode interface process", *Chem. Eng. Sci.*, vol. 56, núm. 8, pp. 2695-2702.
- PLETCHER, D. y F.C. Walsh (1990), *Industrial electrochemistry*, Blackie Academic & Professional.
- RAGNINI, C.A.R., R.A. Di Iglia, W. Bizzo y R. Bertazzoli (2000), "Recycled niobium felt as an efficient three-dimensional electrode for electrolytic metal ion removal", *Water Research*, vol. 34, núm. 13, pp. 3269-3276.
- RIVERA, F. y J.L. Nava (2008), "Mass transport studies at rotating cylinder electrode (RCE). Influence of using plates and concentric as counter electrode", *Electrochemical Acta*, vol. 52, núm. 19.
- ST-PIERRE J., N. Masse, E. Frechette y M. Bergeron (1996), "Zinc removal from dilute solutions using a rotating cylinder electrode reactor", *J. Appl. Electrochem*, vol. 26, núm. 4, pp. 369-377.
- WALSH, F.C. (2001), "Electrochemical technology for environmental treatment and clean energy conversion", *Pure Appl. Chem*, vol. 73, núm. 12, pp. 1819-1837.
- (1993), *A first course in electrochemical engineering. The electrochemical, consultancy*, Romsey.
- WANG-KYU, C., L. Kune-Woo, K. Young-Min, A. Byung-Gil y O. Won-Zin (2000), "Electrolytic removal of  $Ag(I)$  in the liquid wastes generated from the mediated electrochemical oxidation process", *J. of Nucl. Sci. Tech.*, vol. 37, núm. 2, pp. 173-179.

ANNE LAURE BUSSY,\* ICELA BARCELÓ,\*  
HUGO SOLÍS,\* EDGAR LÓPEZ,\*•  
PEDRO ÁVILA,\* CELIA OLIVERA\* Y LUIS MEJÍA\*

## *Los sedimentos en el río Lerma: una posible fuente de contaminación metálica*

### INTRODUCCIÓN

EL SISTEMA HIDROLÓGICO Lerma-Chapala-Santiago es uno de los más importantes de México por la extensión de su cuenca, que ocupa gran parte del Estado de México, norte de Michoacán, sureste de Querétaro, sur de Guanajuato y este, centro y norte de Jalisco (Díaz y Antón, 2002). Desde el nacimiento del río Lerma, las condiciones de deterioro son muy graves para este ecosistema acuático que recibe contaminantes de origen doméstico, industrial y agrícola por las importantes actividades de una población que sigue creciendo (INEGI, 2000). Dada la complejidad de la contaminación resultante y la estrecha relación que existe entre un tratamiento y un tipo de contaminante (Tchobanoglous *et al.*, 2003), el mejoramiento de la calidad del agua de este sistema hidrológico pasa por un estudio detallado de los contaminantes y de su comportamiento frente a los componentes fisicoquímicos y biológicos del ecosistema.

En un ecosistema acuático se puede considerar que existen tres ámbitos para contaminantes, que son: el agua, las partículas (en

\*Área de Química y Fisicoquímica Ambiental. Departamento de Ciencias Básicas de la UAM-A. tel. 01 55 53189361, e-mail: durfi@correo.azc.uam.mx

•Instituto Tecnológico de Toluca. Departamento de Estudios de Posgrado, tel. 01 722 2087224.

\*ININ, Gerencia de Ciencias Ambientales, tel. 0155 53297236.

\*CCRECL. Conjunto Sedagro, 1er. piso Edif. Principal, Metepec, Edo. de México, tel. 01 722 2322664.

\*CNA, Gerencia Estatal, Conjunto Sedagro, Edif. C-1, Metepec, Edo. de México, tel. 01 722 2322636.

suspensión o sedimentadas) y la biota. Las rutas principales para pasar de uno a otro son la adsorción/desorción, la precipitación/disolución y la absorción/excreción biológicas. El agua se considera como la zona donde se encuentran los contaminantes en sus formas más móviles; también, la fase disuelta se reconoce como la principal fuente de metales biodisponibles (Pedroza *et al.*, 2007). Gibbs (1973) estableció que los metales presentes en un cuerpo hídrico se asocian preferencialmente a las partículas en suspensión o a los sedimentos. Jenne y Zachara (1987) proponen cinco mecanismos principales para la asociación de los metales en los sedimentos:

- Adsorción sobre sustancias de grano fino.
- Precipitación de compuestos metálicos.
- Coprecipitación de metales mediante entrapamiento por hidróxidos de Fe, óxidos de Mn y carbonatos.
- Asociación con moléculas orgánicas.
- Incorporación en minerales cristalinos.

Varios autores, como Zhang *et al.* (2002), consideran a los sedimentos como el destino final de la mayoría de los contaminantes. Power y Chapman (1992) precisan que, en este caso, los sedimentos producen un efecto tóxico agudo sobre un número extremadamente reducido de componentes de la biota. Sin embargo, los sedimentos actúan como acarreadores y posibles fuentes de contaminación, ya que los contaminantes que se acumulan aquí no siempre permanecen asociados con los sólidos, y pueden regresar hacia la columna de agua tras cambios en las condiciones ambientales (Ansari *et al.*, 2004).

Para los sedimentos, la posibilidad de capturar o liberar metales depende principalmente de las condiciones fisicoquímicas del medio y de las propiedades químicas de las especies metálicas, así como de los posibles movimientos de estos metales dentro de la columna de sedimento y, finalmente, en la interfase agua-sedimento.

Los sedimentos son el resultado sumamente heterogéneo de la agrupación de varios compuestos: materia orgánica, sulfuros, car-

bonatos, oxihidróxidos de Fe y de Mn, arcillas y arenas. Los metales se asocian con todos estos componentes de la matriz del sedimento con relaciones que pueden ser débiles o más fuertes. Por consecuencia, la medición de la concentración total de un metal en un sedimento es totalmente inapropiada a la determinación de su capacidad a liberarse o de su biodisponibilidad (Rendina *et al.*, 2001). Aunque ciertos autores recomiendan pruebas toxicológicas o de bioacumulación (Beg y Ali, 2008; Di Toro, 2008), otros critican estas prácticas por ser poco representativas de los efectos reales de los contaminantes asociados a los sedimentos sobre la biota, principalmente por no tomar en cuenta los efectos no agudos (estrés, por ejemplo) o las características propias de cada especie (Burton *et al.*, 2000). Sin embargo, desde la década de 1970, existe una metodología de tipo químico que permite describir de manera experimental la distribución geoquímica (o especiación) de los metales en los sedimentos, así como su disposición para liberarse de estas asociaciones: las extracciones químicas secuenciales (Chen *et al.*, 1996). Bacon y Davidson (2008) definen la extracción secuencial como una serie de agentes aplicados a una misma muestra, con la finalidad de subdividir el contenido total de metales.

Los primeros fueron los de Tessier *et al.* (1979) y de Förstner *et al.* (1981). En la mayor parte de los estudios posteriores, los autores retomaron estos esquemas, y recomendaron diferentes tiempos de extracción, o diferentes extractantes (Shiowatana *et al.*, 2001). En particular, lo complejo de esta metodología, generó una tendencia a la simplificación, como lo ilustra la propuesta del Bureau of Community Reference (BCR) en 1998 (Shiowatana *et al.*, 2001). El cuadro 1 presenta unos ejemplos de esquemas de especiación. Desde las primeras propuestas, esta metodología fue ampliamente criticada. En particular, los primeros investigadores asociaban cada fracción de las extracciones a un componente de la matriz del sedimento, lo que resultó un error, ya que estudios posteriores demostraron la no especificidad de los reactivos empleados por una sola fase sólida (Martin *et al.*, 1987), y se definieron las fracciones de manera operacional, como lo ilustra el cuadro 1. Se aclaró también que el resultado dependía del tipo

CUADRO 1

EJEMPLOS DE PROPUESTAS DE ESQUEMAS DE ESPECIACIÓN

Referencia	Fracciones					Residual
	Intercambiable	Ácido-soluble	Fácilmente reducible	Difícilmente reducible	Oxidable	
Tessier 1979	1 M MgCl <sub>2</sub> , (pH 7)	1M CH <sub>3</sub> COONa (pH 5)	0.04 M NH <sub>2</sub> OH.HCl y CH <sub>3</sub> COOH (25%v)	0.02 M HNO <sub>3</sub> y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 30%		HF Y HNO <sub>3</sub> en relación 1:2
Förstner <i>et al.</i> , 1981	NH <sub>4</sub> OA 1 M (pH=7) 2 horas		0.1 M NH <sub>2</sub> OH.HCl pH=2 12 horas	C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 0.2 M H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 0.2 M pH = 3 24 horas	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 30% NH <sub>4</sub> OAc 12 horas en relación 1:100	HNO <sub>3</sub> en relación 1:100
BCR, 1998 en Shiowatana, 2001	AcOH 0.11 M		NH <sub>2</sub> OH *HCl 0.1 M pH 2	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 8.8 M Ph 2-3, NH <sub>4</sub> OAc 1 M pH 2		HNO <sub>3</sub> al 65% y HCl al 37% en relación 9:1
Tessier <i>et al.</i> , 1979	1 M MgCl <sub>2</sub> , (pH =7) 2 horas	1M CH <sub>3</sub> COONa (pH= 5) 5 horas	NH <sub>2</sub> OH *HCl 0.1 M HNO <sub>3</sub> 0.01 M	HNO <sub>3</sub> y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 30% 5 horas 85°C, pH =2 NH <sub>4</sub> OAc y HNO <sub>3</sub> pH = 2 12 horas		HF Y HNO <sub>3</sub> en relación 1:2 Digestión en microondas

Li <i>et al.</i> , 1995 BCR modificado	0.5 M MgCl <sub>2</sub> , pH 7 1.0 M AcONa, pH 5		0.04 M NH <sub>2</sub> OH·HCl en 25% AcOH <sub>4</sub>			H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 8,8 M 0.02 M HNO <sub>3</sub> en relación 1:16
Hall <i>et al.</i> , 1996 BCR modificado	1.0 M AcONa, pH 5		0.25 M NH <sub>2</sub> OH·HCl 0.05 M HCl, 1.0 M NH <sub>2</sub> OH·HCl AcOH al 25%			KClO <sub>3</sub> , HCl, 4M HNO <sub>3</sub> ,
Ho <i>et al.</i> , 1997 BCR modificado	0.11 M AcOH		0.1 M NH <sub>2</sub> OH·H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			H <sub>2</sub> O, 8,8 M 0.02 M HNO <sub>3</sub>
Barceló 2000 Mezcla Tessier <i>et al.</i> y Förstner <i>et al.</i>	1M MgCl <sub>2</sub> , (pH = 7) 2 horas	1M CH <sub>3</sub> COONa (pH= 5)	NH <sub>2</sub> OH. HCl 0.1M HNO <sub>3</sub> 0.01 M pH = 2	C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 0.2 M H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 0.2 M pH= 3	HNO <sub>3</sub> y H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 30% 5 días 85°C pH = 2 NH <sub>4</sub> OAc y HNO <sub>3</sub> pH = 2 12 horas	HF Y HNO <sub>3</sub> en relación 1:2 Digestión en microondas

Fuente: Ver referencias.

de reactivo empleado, de su concentración, del tiempo de contacto y del orden de las extracciones (Bordas y Bourg, 1998). Otras críticas fueron luego consideradas como menos importantes, como la posible readsorción de los metales en el sedimento durante una extracción (Belzile *et al.*, 1989). Hasta la fecha, ningún estudio equivalente o mejor se ha propuesto. A pesar de las críticas, se siguen utilizando estos “esquemas de especiación”.

Además, un sedimento está siempre en evolución. En particular, su componente orgánico podrá llegar, tras millones de años, a transformarse en carburante fósil. En su fase inicial, la parte biodegradable de este grupo de compuestos es hidrolizada y oxidada por varios microorganismos presentes en el medio (Santchi *et al.*, 1990). Los agentes oxidantes empleados dependen principalmente de su abundancia y de la energía liberada por la reacción, aprovechable por los microorganismos (cuadro 2). La molécula de oxígeno, empleada por las bacterias aeróbicas, participa en la reacción que genera la cantidad más grande de energía ( $-475 \text{ kJ/mol}$  de  $\text{CH}_2\text{O}$  liberado; Reeburgh, 1967). En los sedimentos ricos en oxihidróxidos de hierro, estos compuestos parecen ser determinantes en la degradación anaeróbica de la materia orgánica (Roden y Wetzel, 2002). Las diversas reacciones redox generan moléculas reducidas y protones (Sholkovitz, 1973), que modifican las condiciones fisicoquímicas del medio, y en particular disminuyen el potencial de óxido-reducción y el pH. Estas variaciones provocan nuevas reacciones de tipo abiótico como disoluciones y precipitaciones que pueden modificar la afinidad, y por lo tanto las asociaciones, de los metales con los otros constituyentes de los sedimentos. También, la degradación de la materia orgánica particulada genera una liberación en las aguas intersticiales de los metales que estaban asociados con ella, en formas de complejos inorgánicos u orgánicos. La presencia de una cantidad importante de compuestos biodegradables, generados por descargas domésticas, puede aumentar la magnitud de estas reacciones. Si la presencia de descargas industriales genera una contaminación metálica importante del sedimento, la movilidad de los metales asociados puede ser un fenómeno notable en las asociaciones metal-sedimento.



CUADRO 2  
SECUENCIA DE LAS REACCIONES ACOPLADAS  
A LA OXIDACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

Reacción		Energía (kJ/mol de CH <sub>2</sub> O degradado)
Reducción de O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> ↔ H <sub>2</sub> O	-475
Desnitrificación	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ↔ N <sub>2</sub>	-448
Reducción de Mn	Mn(IV) ↔ Mn(II)	-349
Reducción de Fe	Fe(III) ↔ Fe(II)	-114
Reducción de SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ↔ HS	-77
Metanogénesis	CH <sub>2</sub> O ↔ CH <sub>4</sub>	-58

Fuente: Reeburgh (1983).

En estas condiciones, que son las del río Lerma, las consecuencias de la diagénesis pueden comportarse como un ataque químico y relacionarse con la liberación de ciertas fracciones metálicas. Si se considera el esquema de extracciones propuesto por Tessier *et al.*, 1979:

- Fracción 1: metales liberados por un aumento de la fuerza iónica del medio; la degradación de la materia orgánica libera una gran cantidad de especies disueltas (ácidos orgánicos, entre otros).
- Fracción 2: metales liberados por una acidificación del medio; la degradación de la materia orgánica genera especies ácidas (CO<sub>2</sub>, por ejemplo) y provoca una disminución del pH.
- Fracción 3: metales liberados por una reducción del medio; la oxidación de la materia orgánica produce moléculas reducidas como HS<sup>-</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, etcétera, lo que genera una disminución de potencial de oxido-reducción del medio. Además, se favorece la precipitación de sulfuros metálicos.
- Fracción 4: metales liberados por una oxidación del medio; la materia orgánica está oxidada y se liberan los metales que estaban asociados con ella.

- Fracción 5: metales liberados por un ataque de ácidos concentrados hasta la disolución de todas las partículas; esta fracción no debería ser atacada durante la diagénesis.

La disolución consecuente de los metales en las aguas intersticiales está seguida por una difusión de estos iones en los sedimentos (Bussy, 1996). Los metales pueden volver a asociarse con otras partes del sedimento por coprecipitación, precipitación, adsorción, etcétera, y se puede observar una modificación de las concentraciones metálicas en los sedimentos (Bussy *et al.*, 2004). Si existe conjuntamente un fenómeno de compactación, se tendrá un flujo de agua dirigido hacia la superficie del sedimento, favoreciendo los movimientos ascendentes de las especies disueltas. Finalmente, queda posible una liberación de estos iones metálicos en la columna de agua por encima del sedimento, generando una contaminación secundaria del agua por el sedimento.

El estudio de la variación de la especiación de los metales asociado a un sedimento durante la diagénesis de este último puede permitir la determinación de un patrón de comportamiento para un sedimento contaminado por metales y la predicción de una posible contaminación secundaria del agua de un cuerpo acuático por la liberación de los metales acumulados, a veces por años, en los sedimentos.

## METODOLOGÍA

### *Muestreo en el río*

Las muestras de sedimento fueron tomadas en el río Lerma, cerca de la entrada a la presa José Antonio Alzate (J.A. Alzate) exactamente en el puente Temoaya. Los sedimentos fueron colectados manualmente por medio de una draga tipo Ekman. También, se recolectó agua superficial, cerca de la interfase agua/sedimento mediante un muestreador Van Dorn. Después de obtener las muestras del sedimento, éstas fueron cubiertas, cerradas adecuadamente, y conservadas en refrigeración para inhibir el metabolismo de los microorganismos, para su posterior análisis.

### *Envejecimiento del sedimento*

Los sedimentos homogeneizados se colocaron en un reactor y se cubrieron por el agua muestreada (figura 1), para alcanzar condiciones cercanas a las del sedimento encontrado en el río Lerma (sin contacto directo con el aire). Se dejó envejecer al sedimento, cuidando que el nivel del agua se mantuviera constante. Después de cinco meses de envejecimiento, se quitó el agua, se cortó la columna de sedimentos en varios estratos y se muestrearon las aguas intersticiales.

FIGURA 1  
REACTOR



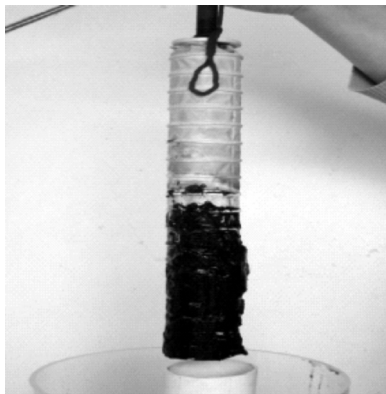
Fuente: Elaboración propia.

### *Muestreo de las aguas intersticiales*

Se colocó en el centro del reactor un muestreador de aguas intersticiales (Aldana, 2007), incluida la interfase agua/sedimento. Este muestreador consistió en un tubo dividido en secciones (cel-das) llenas de agua desionizada y cubiertas por una membrana de

Nylon de  $0.45\ \mu\text{m}$  de diámetro de poro (Biodyne A, Pall), sellando cada una de las celdas (figura 2). Ya instalado, el agua desionizada se equilibró con el agua intersticial en un tiempo de 15 días (Tessier, 1994).

FIGURA 2  
MUESTREADOR DE AGUAS INTERSTICIALES



Fuente: Elaboración propia

### *Análisis de las aguas intersticiales*

Se separaron las aguas intersticiales muestreadas en dos partes: una alícuota se congeló para los análisis de aniones, y otra fracción se acidificó ( $\text{HNO}_3$  concentrado, Ultrex II, Baker) para el análisis de los metales. Se determinaron las especies disueltas y otros parámetros fisicoquímicos en las aguas intersticiales por diferentes métodos:

- Por electroquímica, con varios electrodos (Vernier) se midieron en las muestras de agua intersticial recién muestreada: pH, oxígeno disuelto y iones amonio.
- Por cromatografía de intercambio iónico (HPLC, Shimadzu), siguiendo el método 4110 B del Standard Methods (1998), se analizaron los aniones  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  con una

columna Star-ion A300 (phenomenex) y una fase líquida 1.7 mM  $\text{NaHCO}_3$  / 1.8 mM  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , pasando a un flujo de 1.3 mL/min.

- Por espectrofotometría de absorción atómica (AA240, Varian) se determinaron las concentraciones de los metales totales disueltos empleando: la flama aire- $\text{C}_2\text{H}_2$  para las concentraciones de hierro y manganeso (método 3111 B del Standard Methods, 1998), y el horno de grafito para las concentraciones de cobre (método 3113 B del Standard Methods, 1998).

### *Caracterización de los sedimentos*

Se determinó la humedad de los sedimentos jóvenes y después de envejecimiento mediante secado a 60 °C hasta peso constante. Se calculó la porosidad a partir de este dato y de la masa volumétrica del sedimento.

Se determinó el carbono orgánico en el sedimento liofilizado mediante el método de pérdida por calcinación (CEAEQ, 2003): se sometieron a calentamiento continuo por 16 horas a 375 °C.

Se determinaron los metales totales en los sedimentos por espectrometría de absorción atómica (Thermoelemental, Sol-AArM6), después de una digestión ácida ( $\text{HNO}_3$  y HF concentrados, Analíticos, Baker) en un horno de microondas (Mars 5, CEM).

### *Especiación de los metales asociados a los sedimentos*

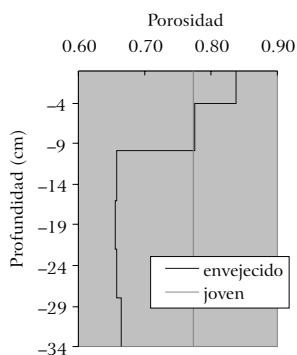
Se determinó la especiación de los metales en los sedimentos mediante extracciones secuenciales, empleando el esquema de Barceló (2000) que considera seis fracciones (cuadro 1). Las soluciones extractantes fueron preparadas usando reactivos químicos de grado analítico y agua desionizada 18 M $\Omega$ . Se hicieron las extracciones en triplicado, sobre un sedimento húmedo. Se ana-

lizaron los metales en el sobrenadante por espectrometría de absorción atómica (Thermo elemental, SolAArM6).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

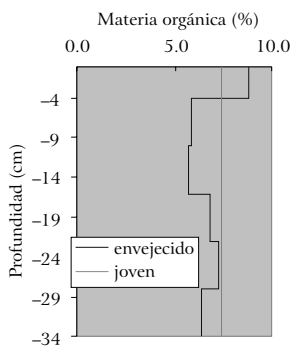
### *Porosidad y contenido en materia orgánica del sedimento*

GRÁFICA 1  
EVOLUCIÓN DE LA POROSIDAD



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICA 2  
EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO ORGÁNICO



Fuente: Elaboración propia.

La gráfica 1, que describe la evolución de la porosidad en función de la profundidad, indica la existencia de un fenómeno de compactación durante el periodo de envejecimiento. El espacio presente entre las partículas de sedimento se reduce mientras empuja el agua intersticial hacia la superficie de la columna de sedimento, así como las sustancias que ellas contienen.

En el sedimento, el contenido de materia orgánica disminuyó en promedio de 1% en peso seco, lo que representa alrededor de 14% de la materia orgánica presente (gráfica 2), lo que confirma la existencia de las reacciones de biodegradación. Se puede notar que esta actividad fue mayor justo debajo de la interfase agua-sedimento. También, el perfil demuestra la presencia de un desplazamiento de las moléculas orgánicas y su reasociación con el sedimento en la misma interfase.

### *Metales en el sedimento*

Como ejemplo, se presenta un metal perteneciente a la matriz de los sedimentos, el hierro, y otro considerado como potencialmente tóxico para ciertas especies, el cobre. Este último tiene una tendencia reconocida a asociarse con la materia orgánica en los sedimentos (Barceló, 2000).

#### *Niveles totales*

El cuadro 3 incluye las concentraciones totales iniciales para los dos metales, así como la desviación experimental de los resultados. El nivel del hierro es mucho más alto, por lo que este metal es uno de los mayores constituyentes del sedimento, así como un contaminante industrial. Estas concentraciones son las más bajas medidas en este sitio desde el principio de los estudios del río Lerma. Sin embargo, son reservas suficientes para permitir liberaciones metálicas en la columna de agua superficial.

CUADRO 3  
NIVELES TOTALES DE METALES EN LOS SEDIMENTOS

<i>Metal</i>	<i>Concentración (mg/kg de materia seca)</i>	<i>Desviación experimental (mg/kg)</i>
Fe	1,825.7	120.6
Cu	9.6	0.5

Fuente: Elaboración propia.

### Especiación

Los resultados obtenidos se comparan con los que obtuvo Barceló (2000) para la misma metodología de extracciones. En ese estudio, se reportan las extracciones secuenciales de sedimentos muestreados en varios sitios del mismo cuerpo acuático. Aunque todos los sedimentos presentan una distribución geoquímica muy parecida para un metal, el cuadro 4 incluye los resultados obtenidos con una muestra colectada en el mismo sitio que el sedimento estudiado aquí. Más de la mitad del hierro (alrededor de 63%) se presenta en la fracción residual, y 31% en la fracción 4, que ataca en particular la parte de oxihidróxidos de Fe del sedimento. Las otras fracciones contienen una parte despreciable de este metal. En particular, las dos primeras son prácticamente inexistentes. Si el cobre presenta también una fracción residual importante (34%), la mayoría de este metal se encuentra asociada con los componentes oxidables del sedimento (materia orgánica y sulfuros). Además, existe una cantidad notable de cobre en la fracción difícilmente reducible. Las dos primeras fracciones, generalmente consideradas como las más móviles (Rendina *et al.*, 2001), no son tan pobres como en el caso del hierro.

Si se consideran los resultados de este estudio, el hierro sigue principalmente en las fracciones residual (F6) y difícilmente reducible, aunque en cantidad menor (43 y 26%, respectivamente). La riqueza de cada fracción para este metal sigue el orden: F6>F4>F2>F3>>F1>F5 (gráfica 3). Este nuevo patrón presenta un hierro mucho más liberable por la disminución de las



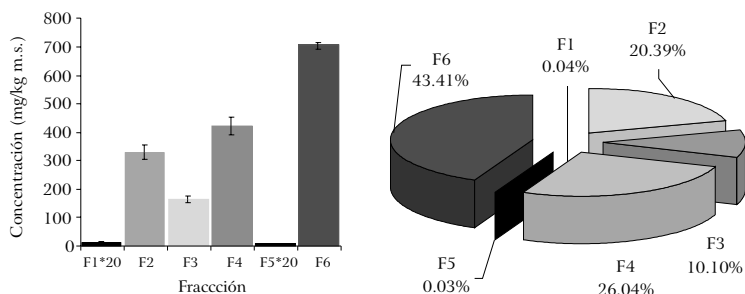
fracciones conocidas como poco móviles: F4, F5 y F6 a favor de las más móviles: F1, F2 y F3. Es interesante notar una casi desaparición de la fracción oxidable (F5), directamente atacada por los microorganismos, y una disminución considerable (20%) de la fracción residual, que se reporta generalmente como “inatacable” en condiciones naturales. Finalmente, la segunda fracción crece del mismo 20 por ciento.

CUADRO 4  
RESULTADOS DE LA ESPECIACIÓN  
EN SEDIMENTOS EQUIVALENTES (%)

Metal	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Fe	0.0	0.1	3.9	31.0	2.3	62.8
Cu	3.7	1.8	0.1	16.8	44.0	33.6

Fuente: Barceló (2000).

GRÁFICA 3  
DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA DEL HIERRO

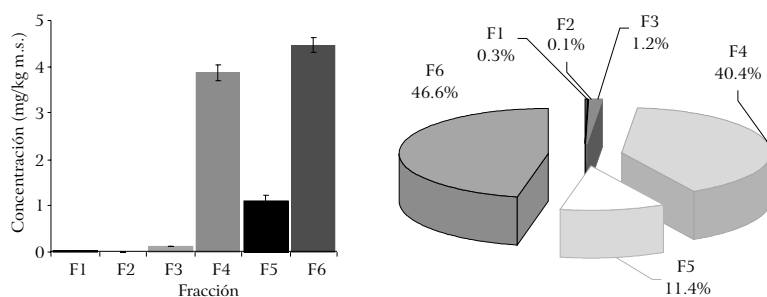


Fuente: Elaboración propia.

Al contrario, el cobre parece reasociarse de manera más estable con el sedimento: aumenta su fracción residual (gráfica 4). Como para el hierro, la fracción más atacada es la F5 (oxidable). Sin embargo, el cobre no se va a fracciones tan móviles como la F2 o

la F1, ambas presentan una disminución, sino que se reasocia con componentes del sedimento destruidos por los ataques de la F6 y de la F4. Es interesante notar que, si existe una cantidad suficiente de materia orgánica biodegradable, esta última fracción podría llegar a disminuir, ya que es una de las más disminuidas en la especiación del hierro (gráfica 3).

GRÁFICA 4  
DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA DEL COBRE

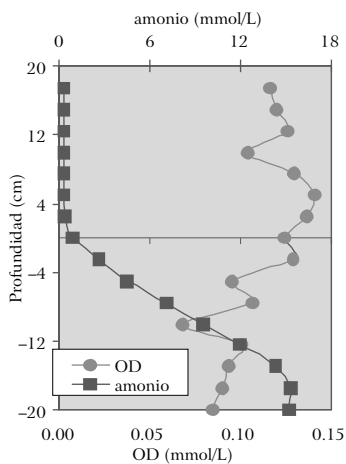


Fuente: Elaboración propia.

### *Moléculas disueltas en aguas intersticiales*

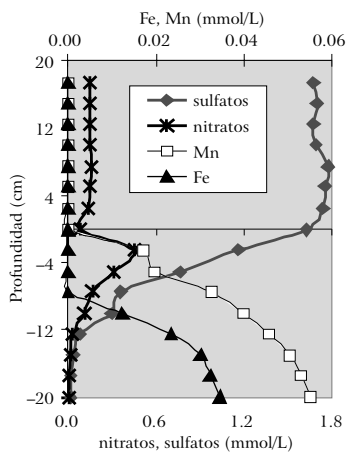
Las gráficas 5 y 6 presentan los perfiles en las aguas intersticiales de algunas moléculas empleadas por los microorganismos como oxidantes (oxígeno disuelto, nitratos y sulfatos), de los productos del consumo de parte del sedimento como oxidante por otros microorganismos (Fe y Mn) y finalmente, de una molécula liberada durante la degradación de la materia orgánica (amonio). No se agotó el oxígeno en el sedimento, pero se nota una disminución de su concentración. La concentración relativamente constante en la columna de agua superficial indica un consumo menor a la capacidad de generación de las fuentes (el aire y las algas). A pesar de la presencia de oxígeno, los microorganismos emplean también los otros oxidantes. Los perfiles casi verifican el orden dado por el cuadro 2: primero se consume el oxígeno, seguido de la aparición del mangane-

GRÁFICA 5  
OXÍGENO DISUELTO Y AMONIO



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICA 6  
Fe, Mn, NITRATOS Y SULFATOS

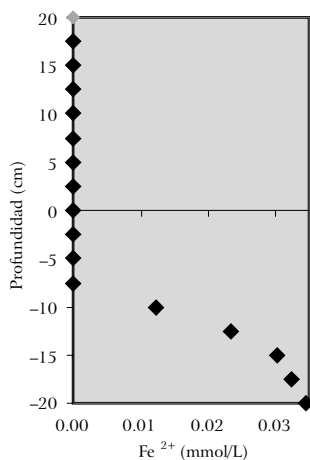


Fuente: Elaboración propia.

so reducido, de la reducción de los nitratos, de la producción de hierro reducido y finalmente, del consumo de los sulfatos. La inversión que se nota entre el manganeso y los nitratos se debe a la producción de nitrato, justo por debajo de la interfase agua-sedimento, probablemente por la oxidación del amonio mediante el oxígeno presente (reacción de desnitrificación).

La gráfica 7 presenta un acercamiento del comportamiento del hierro disuelto en las aguas intersticiales. Una vez liberado de sus compuestos sólidos por reducción a  $\text{Fe}^{2+}$ , este metal se difunde en el agua. Hacia abajo, se acumula en el fondo de la columna, mientras que hacia arriba, se vuelve a precipitar como hidróxido férrico y se reasocia con el sedimento.

GRÁFICA 7  
PERFIL DE  $\text{Fe}$  DISUELTO

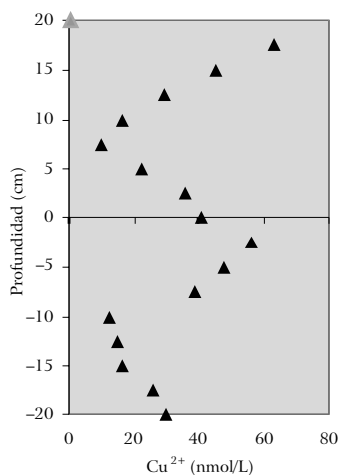


Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento del cobre es más complejo, ya que no participa directamente en la degradación de la materia orgánica como el  $\text{Fe}$ , sino que responde a las modificaciones de su ámbito (gráfica 8). Se nota una liberación de este metal en las aguas intersticiales al nivel de la máxima actividad de degradación (corres-

ponde al mínimo de materia orgánica particulada de la gráfica 2), así como una acumulación en el fondo de la columna y arriba de la columna de agua superficial (el punto a 20 cm representa el nivel del agua en cobre antes de su contacto con el sedimento). Sin embargo, se pueden notar dos mecanismos de reasociación con la fase sólida: en el sedimento (alrededor de 10 cm), cuando también vuelve a precipitar el hierro, lo que corresponde a la modificación de su distribución geoquímica (gráfica 4), y en la columna de agua superficial, probablemente por una reasociación con las partículas en suspensión.

GRÁFICA 8  
PERFIL DE Cu DISUELTO



Fuente: Elaboración propia.

Así, si las propiedades químicas del hierro no le permiten liberarse en la columna de agua en una forma disuelta, vuelve a asociarse cerca de la interfase agua-sedimento y puede ser transportado por los movimientos de la capa superficial del sedimento, parte no consolidada de éste (la gráfica 1 presenta una porosidad de casi 85%, volumen lleno de agua). En el caso del cobre, los mecanismos de

reasociación con los sedimentos no parecen ser suficientes para impedir su liberación en la columna de agua.

## CONCLUSIONES

EN LOS sedimentos del río Lerma, la combinación de los estudios de metales disueltos en las aguas intersticiales y de la distribución geoquímica de los mismos metales asociados a la fase sólida del sedimento permite determinar el comportamiento de los metales en este compartimiento del sistema acuático estudiado cuando se degrada la materia orgánica.

Las modificaciones de las condiciones fisicoquímicas del sedimento generadas por los microorganismos provocan un cambio de las asociaciones del hierro hacia formas más fácilmente movilizables. El oxihidróxido de este metal, siendo un componente de la matriz con el que se asocian los contaminantes metálicos, así los cambios de comportamiento del hierro, pueden favorecer nuevas liberaciones metálicas. No obstante, las propiedades químicas de este metal le impiden regresar en forma disuelta en la columna de agua, ya que se vuelve a precipitar como oxihidróxidos en la interfase agua-sedimento, actuando probablemente como barrera para los metales que se asocian con este nuevo componente del sedimento.

Al contrario, las mismas condiciones generan el aumento de las fracciones menos móviles del cobre y la disminución de las más móviles. Sin embargo, una de éstas es la fracción compuesta principalmente de oxihidróxidos de Fe que puede llegar a disminuir. También, el comportamiento al nivel sólido no impide una liberación de cobre disuelto en la columna de agua.

Así, observando el comportamiento de estos dos metales durante este experimento, se puede establecer que la existencia de materia orgánica biodegradable sedimentada en el río Lerma puede provocar la liberación de parte del cobre asociado a estos sedimentos, haciendo de ellos una fuente de contaminación metálica. También, la neoformación de oxihidróxidos de Fe puede facilitar la con-

centración y el transporte de los mismos contaminantes en forma sólida en la interfase agua-sedimento.

## AGRADECIMIENTOS

ESTE proyecto está financiado por fondos Conacyt-SEP (Ciencias Básicas, clave U42770-R). Los autores dirigen un agradecimiento especial al doctor Manuel Navarrete y al equipo del Laboratorio Central de Instrumentación de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional por sus análisis de metales en aguas intersticiales.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALDANA, J.I. (2007), "Obtención de Perfiles de concentración mediante diálisis: influencia de la naturaleza del medio sobre la cinética de difusión", tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad Autónoma Metropolitana, 93 pp.
- ANSARI, T.M., I.L. Marr y N. Tariq (2004), "Heavy metals in marine pollution perspective-A mini review", *Journal of Applied Sciences*, vol. 4, núm. 1, pp. 1-20.
- BACON, J.R. y C.M. Davidson (2008), "Is there a future for sequential chemical extraction?", *The Analyst*, vol. 133, núm. 1, pp. 25-46.
- BARCELÓ, Quintal, I.D. (2000), "Estudio de la movilidad de Ca, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn en sedimentos de la presa José Antonio Alzate en el Estado de México", tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, UAEM, México, 214 pp.
- BEG, K.R. y S. Ali (2008), "Toxicity of reference sediment samples", *American Journal of Environmental Sciences*, vol. 4, núm. 4, pp. 347-352.
- BELZILE N., P. Lecomte y A. Tessier (1989), "Testing readsorption of trace elements during partial chemical extractions of bottom sediments", *Environmental Science & Technology*, vol. 23, núm. 8, pp. 1015-1020.
- BORDAS, F. y A.C.M. Bourg (1998), "A critical evaluation of sample pre-treatment for storage of contaminated sediments to be investigated for the potential mobility of their heavy metal load", *Water, air, and soil pollution*, vol. 103, núms. 1-4, pp. 137-149.
- BURTON, G.A., R. Pitt y S. Clark (2000), "The role of traditional and novel toxicity test methods in assessing stormwater and sediment

- contamination", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 30, núm. 4, pp. 413-447.
- BUSSY, A.L. (1996), "Mobilité des métaux dans un système fluvial urbain", tesis doctoral, Université Paris XII-Val de Marne, 421 pp.
- , I. Barceló, H. Solís (2004), "Transporte de Fe, Cd y Zn en los sedimentos del río Lerma: influencia de la presa J.A. Alzate, Edo. de México", *Proceedings del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales A.C.*, Organizado por la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, Sección Mexicana de la AIDIS, del 12 al 14 de mayo, Mazatlán, Sin.
- CEAEQ (2003), Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec et Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, *Détermination de la matière organique par incinération: méthode de perte de feu (PAF)*, MA. 1010-PAF 1.0, Ministère de l'Environnement du Québec, 9 pp.
- CHEN, W., S.K. Tan, J.H. Tay (1996), "Distribution, fractional composition and release of sediment-bound heavy metals in tropical reservoirs", *Water, Air and Soil pollution*, vol. 92, núm. 3-4, pp. 273-287.
- DÍAZ, D.C. y D. Antón (2002), *Sequía en un mundo de agua*, Centro Interamericano de Recursos del Agua, 411 pp.
- DI TORO, D.M. (2008), "Review of sediment quality objectives for enclosed bays and estuaries of California", reporte, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware, Newark, 24 pp.
- FÖRSTNER, U., W. Calmano, K. Conradt, H. Jaksch, C. Schimkus y J. Schoer (1981), "Chemical speciation of heavy metals in waste materials (sewage sludge, mining waste, dredge materials, polluted sediments) by sequential extraction", *Proceedings of the International Conference on Heavy Metals in the Environment*, Ámsterdam, CEP Consultants Eds., Edimburgo, pp. 698-704.
- GIBBS, R.J. (1973), "Mechanisms of trace metal transport in rivers", *Science*, vol. 180, núm. 4081, pp. 71-73.
- HALL G.E.M., G. Gauthier, J.C. Pelchat, P. Pelchet y J.E. Vaive (1996), "Application of a sequential extraction scheme to ten geological certified reference materials for the determination of 20 elements", *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 11, núm. 9, pp. 787-796.
- HO M.D. y G.J. Evans (1997), "Operational speciation of cadmium, copper, lead and zinc in the NIST SRM 2710 and 2711 (Montana



- soil) by the BCR sequential extraction procedure and FAAS", *Analytical Communications*, vol. 34, núm. 11, pp. 363-364.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2000), "Estadísticas del medio ambiente en 1999 para México", vol. 1, pp. 114, 118, 129-136.
- JENNE, E.A. y J.M. Zachara (1987), "Factor influencing the sorption of metals. Fate and effects of sediment-Bound Chemicals in aquatic systems", vol. 1: *Fate and transport, case studies, modelling, toxicity*, Baker R.A. Ed. Ann Arbor science publ., pp. 429-444.
- LI X.D., B.J. Coles, M.H. Ramsey y I. Thornton (1995), "Chemical partitioning of the new National Institute of Standards and Technology Standard Reference Materials (SRM 2709-2711) by sequential extraction using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry", *Analyst*, vol. 120, núm. 5, pp. 1415-1419.
- MARTIN, J.M., P. Nirel, y A.J. Thomas (1987), "Sequential extraction techniques: promises and problems", *Marine Chemistry*, vol. 22, núm. 4, pp. 313-341.
- PEDROSA, P., S.C.M. de Magalhães y C.E. Rezende (2007), "Linking major nutrients (C, H, N, and P) to trace metals (Fe, Mn, and Cu) in lake seston in southern Brazil", *Limnology*, vol. 8, núm. 3, pp. 233-242.
- POWER, E.A. y P.M. Chapman (1992), "Assessing Sediment quality", en *Sediment Toxicity Assessment*, G.A. Burton Jr. (ed.), Boca Raton, Lewis Publishes, pp. 1-18.
- REEBURGH, W.S. (1967), "An improved interstitial water sampler", *Limnology & Oceanography*, vol. 12, núm. 1, pp. 163-165.
- (1983), "Rates of biogeochemical processes in anoxic sediments", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 11, mayo, pp. 269-298.
- RENDINA, A., L. de Cabo, S. Arreghini, M. Bargiela y I.A. de Fabrizio (2001), "Geochemical distribution and mobility factors of Zn and Cu in sediments of the Reconquista River, Argentina", *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 17, núm. 4, pp. 187-192.
- RODEN E.E. y R.G. Wetzel (2002), "Kinetics of microbial Fe(III) oxide reduction in freshwater wetland sediments", *Limnology & Oceanography*, vol. 47, núm. 1, pp. 198-211.
- SANTCHI, P., P. Höhener, G. Benoît, y M. Buch Holtzten Brink (1990), "Chemical processes at the sediment-water interface", *Marine Chemistry*, vol. 30, pp. 269-315.

- SHIOWATANA, J., N. Tantidanai, S. Nookabkaew y D. Nacapricha (2001), "A novel continuous-flow sequential extraction procedure for metal speciation in solids", *Journal Environment Quality*, vol. 30, julio-agosto, pp. 1195-1205.
- SHOLKOVITZ, E. (1973), "Interstitial water chemistry of the Santa Barbara Basin sediments", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 37, núm. 9, pp. 2043-2073.
- TCHOBANOGLOUS, G., F.L. Burton y H.D. Stensel (2003), *Wastewater engineering: treatment and reuse*, 4a. ed., Nueva York, McGraw-Hill, 1848 pp.
- TESSIER, A. (1994), "Análisis de los mecanismos de interacción entre sólidos y metales tóxicos de interés ambiental en ecosistemas acuáticos". Curso realizado en el CIEP de la Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, del 12-15 de abril.
- , P.G.C. Campbell y M. Bisson (1979), "Sequential extraction procedure for the speciation of particulate metals", *Analytical Chemistry*, vol. 51, núm. 7, pp. 844-851.
- ZHANG, S., S. Wang y X. Shan (2002), "Distribution and speciation of heavy metals in surface sediments from Guanting reservoir, Beijing", *Journal of Environmental Science Health*, vol. A37, núm. 4, pp. 465-478.

EDGAR LÓPEZ,\* • ICELA BARCELÓ,\* PEDRO ÁVILA,\*  
ANNE LAURE BUSSY,\* HUGO SOLÍS,\* BEATRIZ GARCÍA\*  
Y CELIA OLIVERA\*

*Movilidad geohidrodinámica  
de metales pesados en la cuenca alta  
del río Lerma, ríos tributarios y la presa  
José Antonio Alzate en el Estado de México*

INTRODUCCIÓN

EN MÉXICO, DE ACUERDO con el diseño de la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), en el 2002, a escala nacional solamente 10% de las aguas superficiales eran de buena calidad, en tanto que eran de media 65% y mala 25% restante. Las regiones administrativas de la Conagua que presentan los porcentajes de estaciones con mayor contaminación medida mediante la demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ) son: Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala (45%), Golfo Centro (8.7%) y Balsas (4.1%). A escala nacional, 4.7% de las estaciones presenta este tipo de contaminación, mientras que 10.3% aparece con indicios de contaminación, 20.6% con buena calidad y 64.4% no registran contaminación. Las aguas residuales generadas en los centros urbanos ascendieron a 2.15 millones de toneladas de  $\text{DBO}_5$  al año, de éstas, 1.73 millones de toneladas se recolectan en el drenaje municipal y sólo 0.33 millones de toneladas son removidas en los sistemas de tratamiento. En el 2003 había 1,360 plantas de tratamiento para aguas resi-

\* Área de Química y Físicoquímica Ambiental, Depto. C.B.I., Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco [jibarceloq@gmail.com y/o leemp@correo.azc.uam.mx], tel. y fax 53189360.

• Instituto Tecnológico de Toluca, Departamento de Estudios de Posgrado, tel. 01 7222087224.

\*ININ, Gerencia de Ciencias Ambientales, tel. 01.53297236.

\*CCRECRL, Conj. Sedagro, 1er. Piso, Edif. Principal, Metepec, Estado de México, tel. 01 722 2322664.

duales municipales con capacidad para tratar 89,585 L/s; 1,182 se encontraban en operación y registraron un gasto tratado de 60,243 L/s del total de agua residual tratada en las plantas. La Conagua considera al río Lerma como un sistema de captación con alta prioridad para la conservación, éste es una fuente mayor para el suministro de agua, sin embargo, es uno de los cuerpos de agua más contaminados en México (Conagua, 2000). Nace en el Lago Chignahuapan (Almoloya del Río) al este sureste de la ciudad de Toluca, en el Estado de México, y termina en el mayor lago de México, el Lago de Chapala, en el estado de Jalisco. A esta parte se le conoce como Cuenca Alta del río Lerma.

El Estado de México, a partir de 1960, se ha industrializado a gran escala, por lo que empezó a generar una gran cantidad de desechos, que en conjunto con las descargas de origen doméstico y agrícola, además de la disminución de su caudal, comenzaron a convertir este río en uno de los más contaminados del país. En el curso de este río, 25 kilómetros aguas abajo, se encuentra como primer cuerpo receptor la presa José Antonio Alzate (PJAA) (Conagua, 1993) –situada a 25 kilómetros al noreste de la Ciudad de Toluca– la cual se construyó como un sistema de control de avenidas y para el aprovechamiento integral del río Lerma con el fin de evitar los desbordamientos del mismo, producidos por la alta precipitación pluvial, y como almacenamiento de agua para el riego agrícola. Aparte de la corriente de aguas residuales provenientes de Toluca, otras poblaciones y desarrollos urbanos, así como los aportes agrícolas de ríos tributarios, como el Tejalpa y el Temoaya son los causantes de la introducción a la PJAA de una complejidad de material contaminante que ha afectado gravemente su calidad en todos los aspectos. El agua residual, además, tiene numerosos nutrientes, los cuales pueden estimular el crecimiento de vegetales acuáticos que tienden a eutrofizar los cuerpos de agua y que además pueden contener o acumular compuestos tóxicos que complican más los problemas ambientales y de salud. Por ello, es necesario establecer estrategias de tratamiento que

ayuden a los procesos naturales de depuración de los cuerpos que reciben estas aguas residuales.

Es importante señalar la competencia que se establece por el uso del agua, tanto por la ciudad, como por la industria y la agricultura en el Estado de México, pues las tres necesitan cada vez mayores cantidades. Las descargas no controladas de aguas residuales, municipales e industriales, sin tratar o parcialmente tratadas y los escurrimientos de las aguas utilizadas en el riego agrícola, implican la contaminación continua de las aguas, comprometiendo cada vez más su aprovechamiento para usos múltiples (Ávila, 2001). La cantidad de agua disponible tiende a disminuir, en consecuencia se hace necesario el uso de las aguas negras del río Lerma. Dado el origen de estas aguas, es recomendable monitorear su calidad para tener la confianza de que no representa un peligro de contaminación en los cultivos o para el suelo e incluso para la salud de los habitantes.

El estudio del comportamiento fisicoquímico y biológico de los diferentes cuerpos de agua es difícil, debido a la variedad de interacciones que se llevan a cabo entre los diferentes compuestos inorgánicos y orgánicos (Solís *et al.*, 1997; Barceló *et al.*, 2000) entre éstos y la biota propia del lugar (Ávila *et al.*, 2001). Si además, los cuerpos de agua están contaminados, el estudio se torna más complejo, debido a que el material antropogénico, al interactuar con el geogénico, incrementa las variedades fisicoquímicas y biológicas, por lo que cambian las propiedades del sistema acuoso como: la cantidad de oxígeno disuelto, el pH, la temperatura, etcétera, que generan especies químicas que pueden representar un peligro a los entes vivos de un ecosistema, a su vez disminuye la calidad del agua, y llegan incluso a degradar gravemente el medio.

Cuando se presentan velocidades de flujo bajas en los cuerpos de agua y se unen a condiciones turbulentas que favorecen la formación de agregados grandes, los sedimentos cohesivos presentan una tendencia a precipitar en estas zonas (Einstein y Krone, 1962; Ariathurai y Mehta, 1983), además, de que son un sitio favorable para la acumulación de sedimentos en el fondo.

La contaminación de aguas superficiales por fuentes puntuales y no puntuales es un problema crítico de calidad de agua que ha llamado bastante la atención. Esta preocupación está basada en el mayor conocimiento del comportamiento de los contaminantes, como los metales y plaguicidas, en los humanos y los ecosistemas acuáticos. El impacto potencial que los contaminantes tienen sobre los ambientes acuáticos y las posibles alternativas de remediación sólo puede evaluarse si el transporte y el destino de tales contaminantes son conocidos. A su vez, la habilidad de predecir las futuras distribuciones del contaminante, incluso la acumulación en sedimentos del fondo y su posible efecto en comunidades acuáticas, es esencial para mitigar la contaminación en aguas superficiales.

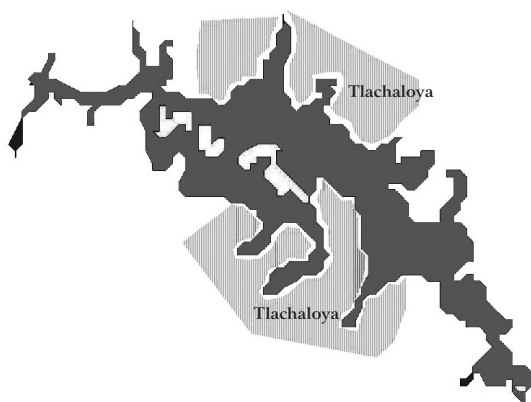
Un componente indispensable de la valoración y predicción de efectos ambientales de contaminantes, como los metales en aguas superficiales, es la evaluación del transporte, tasa y destino de los contaminantes en el sistema. Para simular el transporte de contaminantes es necesario no sólo reproducir los procesos fisicoquímicos de los contaminantes, en los ambientes acuáticos (por ejemplo, adsorción/desorción), sino también los cambios en los diversos factores (por ejemplo, pH) que los gobiernan. Esto último requiere de predecir la hidráulica, calidad de agua y transporte del sedimento en el sistema acuático, porque el movimiento de aguas superficiales, los sedimentos y contaminantes están muy acoplados. Por ejemplo, el papel de sedimentos en la acumulación de los niveles del contaminante en ambientes como presas, lagos y marinas se ha demostrado en varios estudios (Bauer, 1981; Medine y McCutcheon, 1989).

Los sedimentos cohesivos (en particular arcillas, las cuales pueden adsorber los contaminantes) tienen un área superficial grande en proporción a su volumen, carga eléctrica negativa superficial y cationes intercambiables. Los sedimentos cohesivos pueden influir en la calidad del agua y afectar la vida acuática, al proporcionar una capacidad asimilativa grande y actuar como un mecanismo de transporte para los contaminantes disueltos y particulados.

## MÉTODO

Se muestrearon varios sitios de la presa (figura 1), de acuerdo con las características de cada zona (Barceló, 2000). Se utilizó un equipo Van Dorn para la recolección de muestras a diferentes profundidades. Se recolectaron muestras de cada columna de agua y a dos profundidades (20 cm y fondo, cuidando de no remover el sedimento al recolectar la muestra) en cada columna de agua mencionada para la determinación de aniones y metales.

FIGURA 1  
PRESA ALZATE



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se indica el tratamiento que se le dio a cada muestra: todas fueron centrifugadas a 4500 rpm, utilizando una centrífuga Beckman Coulter, Allegra Tm 21 Centrifuge por un tiempo de 20 minutos y se filtró al vacío utilizando filtros de acetato de celulosa con poro  $0.45\ \mu\text{m}$ . Se les agregó 1 mL de ácido nítrico, grado "ultrapuro" (Merck), por litro de muestra, además de refrigerarlas. Se tomó una parte de la muestra (aproximadamente  $100\ \mu\text{L}$ ) para análisis directo mediante espectrofotometría de absorción atómica por horno de grafito, (usando un Horno de Grafito). Cada análisis se realizó por triplicado para obtener un

valor promedio con una buena correlación estadística en cuanto a reproducibilidad y exactitud. El pH, conductividad y temperatura se midieron con un equipo de campo Corning, previamente calibrado. El pHmetro fue recalibrado periódicamente con soluciones amortiguadoras (buffer). Se empleó un electrodo calibrado en microsiemens ( $\mu\text{S}$ ) para el caso de la conductividad. La temperatura se tomó con un termómetro calibrado integrado a este equipo. El oxígeno disuelto fue medido mediante un equipo ysi *in situ*.

Para simular la movilidad hidrodinámica de metales, se utilizó el *software* Surface-Water Modeling System (SMS) versión 8.1 de la Universidad de Brigham Young. Este software requiere de un mapa digitalizado de la zona para la generación de una malla, para calcular posteriormente la hidrodinámica (subrutina RMA2), y finalmente poder estimar el transporte advectivo del contaminante (subrutina RMA4).

El programa RMA2 resuelve las ecuaciones de masa y momento en dos direcciones, integrada con la profundidad (US Army Corps, 1997). Las ecuaciones utilizadas fueron:

$$\begin{aligned} & h \frac{\partial u}{\partial t} + h u \frac{\partial u}{\partial x} + h v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[ E_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + g h \left[ \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial y} \right] \\ & + \frac{g u n^2}{(1.486 h^{1/3})^2} (u^2 + v^2)^{3/2} - \zeta V_*^2 \cos \psi - 2 h v \omega \sin \frac{\pi}{6} = 0 \quad (\text{Ecuación 1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & h \frac{\partial v}{\partial t} + h u \frac{\partial v}{\partial x} + h v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[ E_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + g h \left[ \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial y} \right] \\ & + \frac{g v n^2}{(1.486 h^{1/3})^2} (u^2 + v^2)^{3/2} - \zeta V_*^2 \cos \psi - 2 h u \omega \sin \frac{\pi}{6} = 0 \quad (\text{Ecuación 2}) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (\text{Ecuación 3})$$



Donde:

$h$  = profundidad del agua

$u, v$  = velocidad en la dirección  $x$  y  $y$

$t$  = tiempo

$\rho$  = densidad del fluido

$E$  = Coeficiente de viscosidad de Eddy

$g$  = aceleración de la gravedad

$a$  = elevación del fondo

$n$  = Valor del coeficiente de rugosidad de Manning

$\zeta$  = Coeficiente empírico del esfuerzo de corte del viento

$V_a$  = Velocidad del viento

$\psi$  = Dirección del viento

$\omega$  = Tasa de rotación angular de la Tierra

$\Phi$  = Latitud local

La ecuación gobernante para el transporte de contaminante disuelto del RMA4 (US Army, 2001) es:

$$\frac{1}{h} \left( \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \sigma + kC + \frac{R(C)}{h} \right) = 0$$

(Ecuación 4)

Donde:

$h$  = profundidad del agua

$C$  = concentración del contaminante

$t$  = tiempo

$u, v$  = velocidad en la dirección  $x$  y  $y$

$D_x, D_y$  = Coeficiente de mezclado turbulento (dispersión)

$k$  = constante cinética de primer orden del contaminante

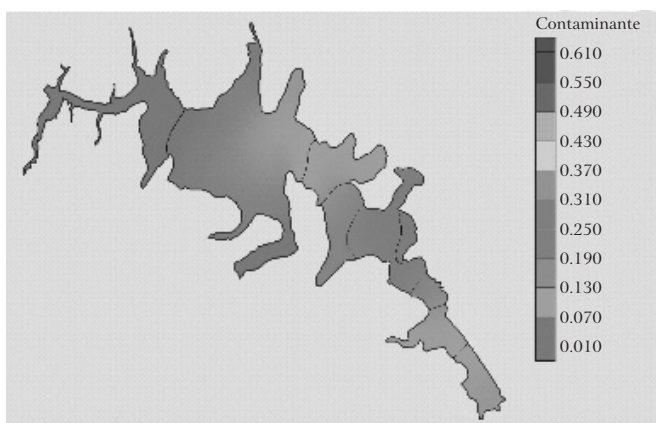
$R(C)$  = Tasa de lluvia/evaporación.

## RESULTADOS

El pH más ácido lo presentó el río Lerma, el que conduce la mayor parte del agua residual industrial, mientras que en la pre-

sa Alzate es ligeramente alcalino, tanto para la superficie como para el fondo. En general, en el estiaje se presentó una conductividad mucho más alta que en el periodo posterior a las lluvias, siendo el río Lerma el de mayor valor, lo que significa que existe en este río una alta disolución de iones. Los ríos Tejalpa y Temoaya tuvieron la menor conductividad, en especial el Temoaya. En cuanto a los sitios al interior de la presa, presentaron, respecto al río Lerma, una disminución en la conductividad, donde la velocidad es muy pequeña y permite una fuerte interacción de los iones metálicos con el material en suspensión, de forma tal que son conducidos al fondo de las columnas de agua y pasan al sedimento y/o a una probable precipitación química al formar compuestos insolubles. El río Lerma presentó muy baja oxigenación en todo el año, tanto en la superficie como en el fondo. Los ríos Tejalpa y Temoaya, tanto en el estiaje como en el periodo posterior a las lluvias, tuvieron mejores condiciones en cuanto al  $O_2$  disuelto, mejorando en este último periodo. Al mezclarse en las confluencias con el río Lerma, este parámetro mejora, pero en la presa vuelve a disminuir.

FIGURA 2  
SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTE



Fuente: Elaboración propia.

En la simulación se consideró una alimentación constante en la concentración del contaminante para cada periodo. Se presenta un gráfico (figura 2) obtenido con el software SMS. Cada línea corresponde a un nivel de concentración de la columna de la derecha, se simularon periodos de un año.

## CONCLUSIONES

CON EL software SMS se pudo realizar una simulación aceptable del transporte de los metales disueltos en el agua. En general, se presentó en promedio un error menor a 10%. El software resultó adecuado como una primera aproximación para el diagnóstico de la calidad del embalse, si se considera que se basa exclusivamente en parámetros hidrológicos y no se toman en cuenta a los diferentes parámetros fisicoquímicos. El río Lerma es el principal conductor de los contaminantes, debido a su baja velocidad y su pobre oxigenación, lo que provoca que predominen las condiciones reductoras, que a su vez causan que el agua de la presa sea afectada en su calidad.

## AGRADECIMIENTOS

ESTE proyecto está financiado por los fondos sectoriales Semarnat-Conacyt, clave 2002-C01-0504 y Conacyt-SEP (Ciencias Básicas) U42770-R.

## BIBLIOGRAFÍA

- ARIATHURAI, R. y A.J. Mehta (1983), "Fine sediments in waterway and harbor shoaling problems", *International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries*, Colombo, Sri Lanka, marzo.
- ÁVILA, P. (2001), "Dinámica de metales pesados no esenciales en la interacción agua/sedimento/biota de la presa J.A. Alzate", tesis doctoral, CIRA, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México.
- BARCELÓ-QUINTAL, I.D. (2000), "Estudio de la movilidad de Ca, Cd, Fe, Mn, Pb, y Zn en sedimentos de la presa J.A. Alzate en el Estado de

- México”, tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México.
- , H. Solís Correa, C. González, P. Ávila-Pérez y J. García (2000), “Determination of cadmium and lead species in the water column of the J.A. Alzate Reservoir, Mexico”, *Environ. Wat. Res.*, vol. 72, núm. 2, pp. 132-140.
- BAUER, L. (1981), *Water quality and heavy metals in sediments of thirty-six florida marinas*, M.S. Project Report, Dept. of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville.
- CNA, Comisión Nacional del Agua (1993), “Actualización de la información de los acuíferos del alto Lerma (Valles de Toluca e Ixtlahuaca, Edo. de México), y la adaptación de su modelo DAS al lenguaje basic”. Documento de la DGCCH, México.
- (2000), “Inventario de Plantas de Tratamiento del Estado de México”, reporte preparado por la Subdirección General Técnica, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, Subgerencia de Estudios de Calidad del Agua e impacto ambiental.
- EINSTEIN, H.A. y R.B. Krone (1962), “Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 67, núm. 4, abril, pp. 1451-1464.
- MEDINE, M. y J. McCutcheon (1989), “Fate and transport of sediment associated contaminants”, en J. Sexena (ed.), *Hazzard Assesment of Chemicals*, vol. 6, Hemisphere Publishing Co., Nueva York, pp. 225-291.
- SOLÍS, H.E., I.D. Barceló, C. González, J. García, P. Ávila y J.A. García (1997), “Variación de parámetros fisicoquímicos en la Presa J.A. Alzate”, *Memorias Técnicas del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales*, del 4 al 7 de noviembre, t. II. Zacatecas, Zac.
- US Army Corps (1997), *Users Guide to RMA2 WES Version 4.3*. Wextech Systems, 227 pp.
- (2001), *Users Guide to RMA4 WES Version 4.5*. Wextech Systems, 171 pp.

DIANA PIMENTEL GONZÁLEZ,\* SERGIO REVAH,•★  
RAFAEL G. CAMPOS MONTIEL,\* ÓSCAR MONROY HERMOSILLO\*  
Y EDUARDO J. VERNON CARTER •♦

## *Entrampamiento de un consorcio microbiano para biorremediación de acuíferos contaminados con MTBE*

### RESUMEN

LA CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS por metil *tert*-butil éter (MTBE), componente de la gasolina desde 1989, se da por derrames accidentales del combustible. Los estudios realizados afirman que la remoción fisicoquímica de MTBE es extremadamente difícil y costosa. La opción más viable es la biorremediación. No obstante, los microorganismos capaces de degradar contaminantes no están o están insuficientemente presentes de forma natural en el medio a tratar. En el presente trabajo, se propone proteger a un consorcio microbiano degradador de MTBE entrampándolo en emulsiones múltiples agua en aceite en agua ( $W_1/O/W_2$ ), cinéticamente estables, para resistir el paso por el sistema de inyección en los poros de los acuíferos.

Se comparó el efecto de la presencia del consorcio microbiano en la estabilidad de la emulsión formulada estabilizada con 0.2% de ácido poliacrílico. Las emulsiones con el consorcio microbiano entrampado fueron estables, tuvieron un diámetro de  $18.14 \pm 1.47 \mu\text{m}$ . La tasa de degradación de MTBE por el consorcio

\* Profesor(a) del ICAP-Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Tulancingo, Hgo., México, DP y Raf.

• Investigador del Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.

\* Profesor-investigador del Departamento de Procesos y Tecnología, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa.

♦ Investigador del Departamento de Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.

♦ Correspondencia a: Fax: + (52) 5558044900; [jvc@xanum.uam.mx].

microbiano atrapado en la emulsión  $W_1/O/W_2$  fue de  $12.4 \pm 7 \text{ mg}_{\text{MTBE}} \text{mg}_{\text{proteína}}^{-1} \text{h}^{-1}$  con una eficiencia de eliminación de  $60.7 \pm 5.1\%$  en un ciclo de 288 h. El diámetro volumétrico medio  $D_{3,0}$  del glóbulo de la emulsión múltiple  $W_1/O/W_2$ , obtenido con el consorcio microbiano, se encuentra dentro del rango para su aplicación en la biorremediación de un acuífero contaminado ( $<50 \mu\text{m}$ ).

## INTRODUCCIÓN

LAS EMULSIONES múltiples son membranas líquidas y han sido propuestas como soluciones a un gran número de problemas de eliminación de residuos en aguas (Li, 1968). La fase interna y externa de las emulsiones múltiples agua en aceite en agua ( $W_1/O/W_2$ ) son parecidas químicamente y la fase oleosa intermedia es inmiscible y las separa físicamente (Dickinson, 1992). La fase oleosa contiene emulsificantes y aditivos y encapsula glóbulos microscópicos de la solución acuosa de reactivos apropiados para remover y atrapar contaminantes de aguas residuales (Kitagawa *et al.*, 1977).

El método de las dos etapas es el más utilizado para realizar las emulsiones múltiples  $W_1/O/W_2$  (Matsumoto, 1987). En la primera etapa de este método, una emulsión primaria agua en aceite ( $W_1/O$ ) se prepara empleando un exceso de emulsificante lipofílico, y aplicando una fuerte homogeneización, para formar las gotas o glóbulos más pequeños posibles. En la segunda etapa, una emulsión múltiple  $W_1/O/W_2$  se forma por la adición de la emulsión  $W_1/O$  al agua, en la cual un emulsificante hidrofílico ha sido disuelto. Una típica emulsión  $W_1/O/W_2$  consiste de glóbulos internos de la emulsión  $W_1/O$  de tamaño  $0.5\text{--}2 \mu\text{m}$  y glóbulos externos de  $10\text{--}60 \mu\text{m}$ .

Desde el punto de vista termodinámico, las emulsiones nunca son completamente estables en el sentido absoluto, porque las interfases son los lugares de energía libre superficial, y si dos glóbulos se encuentran juntos, hay una reducción neta en el área interfacial. Por esta razón, la coalescencia de los glóbulos es un

proceso termodinámicamente espontáneo, pero el proceso inverso requiere gasto de energía y por eso no ocurre espontáneamente (Sherman, 1968). Las emulsiones son altamente dinámicas, por lo que ocurren movimientos e interacciones continuas en el tiempo que afectan las propiedades fisicoquímicas de la emulsión (Dickinson, 2003).

Una emulsión que contiene glóbulos pequeños usualmente tiene una estabilidad cinética más grande, que una que contenga glóbulos grandes, aunque sea más inestable termodinámicamente (McClements, 1999). Una emulsión cinéticamente estable ocurre cuando no se presentan cambios marcados en la distribución del tamaño de los glóbulos, o su estado de agregación, o su arreglo espacial en la escala del tiempo de observación. Esta escala de tiempo puede variar de horas a meses, dependiendo de la situación (Dickinson, 2003). Otros factores que desempeñan un papel importante en la estabilidad de la emulsión son el pH (óptimo 4-8); resistencia a altas fuerzas de corte; presencia de sales o cationes solubles; tamaño de glóbulo, así como el método de emulsificación; el tipo y concentración de emulsificante, la temperatura y la viscosidad (Dickinson, 1993). Es recomendado el uso de una mezcla de compuestos, un emulsificante lipofílico en la fase oleosa y un polímero hidrofílico en la fase acuosa externa para permitir una emulsión múltiple  $W_1/O/W_2$  persistente en el proceso de emulsificación (Allouche *et al.*, 2003).

En el presente estudio, se utilizó ácido poliacrílico (AP) como polímero predominantemente hidrofílico; tiene una pequeña porción lipofílica que se adsorbe en la interfase aceite-agua, y la porción hidrofílica se hincha en agua, formando una red de gel alrededor de los glóbulos de aceite para proveer una estabilidad excepcional por medio del espesamiento y dando un poder de suspensión o estructura a la fase acuosa. La alta viscosidad de las soluciones se debe a la solvatación de los grupos carboxílicos y a la formación de enlaces laterales entre cadenas mediante puentes hidrógeno con una misma molécula de solvente (Salager y Fernández, 2004).

Por otra parte, la encapsulación de células microbianas implica el entrapamiento de microorganismos vivos dentro de una estructura semipermeable de gel polimérico. El uso de células encapsuladas para aplicaciones ambientales tiene muchas ventajas sobre formulaciones con células libres, entre las que se incluyen la protección contra estreses bióticos, tales como depredación por protozoarios y bacteriófagos (Smit *et al.*, 1996), protección contra estreses abióticos, tales como efectos inhibitorios de compuestos tóxicos (Cassidy *et al.*, 1997), potencian la supervivencia y mejoran la actividad fisiológica (Weir *et al.*, 1995), permiten el suministro de aditivos nutricionales coencapsulados (Trevors *et al.*, 1993), el incremento de densidad celular (Lee *et al.*, 1994), entre otras. Además, el entrapamiento puede incrementar las distancias de transporte de células degradadoras en el medio a tratar.

Es necesario obtener una alternativa para remediar la contaminación de aguas subterráneas que existe por fugas de gasolinas reformuladas con MTBE provenientes de tanques subterráneos y de la tubería de distribución asociada al combustible. El MTBE es considerado un alto contaminante debido a su gran solubilidad en agua (Davidson y Parsons, 1996), naturaleza recalcitrante (Mormile *et al.*, 1994), su nula adsorción en el suelo, baja retención en materia orgánica, baja biodegradabilidad (Fayolle *et al.* 2001) y su neurotoxicidad (HEI, 1996; Happel *et al.*, 1998). La legislación mexicana no regula la presencia del MTBE en agua potable, por lo que se consideran los límites establecidos por la US Environmental Protection Agency (1997); para MTBE es de 20 a 40  $\mu\text{g/L}$ . El primer caso de contaminación de acuíferos por MTBE (600  $\mu\text{g/L}$ ) fue reportado en 1996 en Santa Mónica, California (US Environmental Protection Agency, 1999). En México, el MTBE en la gasolina está presente desde 1989, y aun cuando se sabe que es un contaminante potencial, se le ha dado muy poca importancia para investigar el impacto ocasionado en los acuíferos.

Se han sugerido alternativas fisicoquímicas para la remediación de contaminación con MTBE en aguas subterráneas (Davidson, 1997), pero estos estudios abordan concentraciones de MTBE moderadamente altas ( $>1000 \mu\text{g/L}$ ). Las técnicas usuales para



limpiar acuíferos contaminados (inyección de aire, filtros de carbón activado, etcétera) son costosas y relativamente ineficientes para eliminar el MTBE. Esta es la razón por la cual el proceso de biorremediación es particularmente interesante con consorcios microbianos con MTBE como única fuente de carbono (Fayolle *et al.*, 2001), y con bacterias como *Pseudomonas putida* GPO1 (Johnson y Hyman, 2006), y *Mycobacterium vaccae* JOB5 (Johnson *et al.*, 2004) para la oxidación de MTBE.

Aunque también la biodegradación en reactores presenta algunas desventajas en la práctica, ya que existe una alta demanda de energía para la degradación de MTBE que se refleja por la baja eficiencia de producción de biomasa (Fortin *et al.*, 2001) y por otro lado, el problema que representa la separación de biomasa posterior al tratamiento del agua. Por todo lo anterior, se pretende contribuir a eliminar este problema ambiental por medio del entrampamiento de un consorcio microbiano degradador de MTBE en un sistema de emulsiones múltiples  $W_1/O/W_2$  cinéticamente estables que muestra la eficiencia del consorcio microbiano en la degradación de MTBE.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Reactivos*

Se utilizó el polímero sintético AP (Pemulen TR-1®, de Noveon Inc., Ohio, EU) para estabilizar la emulsión múltiple  $W_1/O/W_2$ ; aceite mineral ligero (Marcol GX, México) como fase oleosa; monooleato de sorbitán Span 80 (Canamex Químicos, México) como emulsificante lipofílico. Metil ter-butil éter (98%) de Aldrich Chemicals, EU. Todas las demás sustancias químicas usadas en este estudio fueron de grado reactivo.

### *Consortio microbiano y medio de crecimiento*

El consorcio microbiano aerobio (CM) fue previamente aislado de capas superiores de suelos contaminados con gasolina (México,

DF, México). El cultivo fue suspendido en un medio mineral enriquecido con sales (MM) (cuadro), suministrado con MTBE (140 mg/L) como única fuente de carbono en un reactor con un volumen de operación de 1.5 L a temperatura ambiente (25°C) y se mantuvo con agitación de 130 rpm y aireación constante (López *et al.*, 2004).

### COMPOSICIÓN DE MM UTILIZADO POR EL CONSORCIO MICROBIANO PARA LA DEGRADACIÓN DE MTBE

Compuesto	Concentración g/L <sub>(agua)</sub>	Elementos traza	
		Compuesto	Concentración g/L <sub>(agua)</sub>
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	2		
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1	FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.2
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.5	ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	1.44
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.1	MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	0.8411
KNO <sub>3</sub>	2.3	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.2621
Trazas	5 (mL/L)	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.0620
YNB*	0.1	NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.09
* = Yeast Nitrogen Base		Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.49

Fuente: Elaboración propia.

### *Producción de emulsiones múltiples W<sub>1</sub>/O/W<sub>2</sub> para entrapar al consorcio microbiano degradador de MTBE*

Se comparó la estabilidad de una emulsión múltiple abiótica como control, con la emulsión múltiple conteniendo en su interior el consorcio microbiano. La fase acuosa de la emulsión primaria W<sub>1</sub>/O estuvo compuesta de MM (abiótica) y MM con el consorcio microbiano (biótica), y fue emulsificada en aceite mineral con 8% Span 80 con una fracción de fase dispersa  $-\Phi-$  de 0.3. La emulsión W<sub>1</sub>/O fue formada en un homogeneizador Silverson L4R (Silverson Machines, Ltd., Waterside, Chesham Bucks, Inglaterra), a 8000 rpm durante 10 minutos manteniéndose la temperatura a 35 °C. Para formar las emulsiones múltiples W<sub>1</sub>/O/W<sub>2</sub>, se utilizó el método de las dos etapas (Sosa-Fragoso, 2004), que

consistió en reemulsificar a la emulsión primaria  $W_1/O$  en la fase acuosa externa ( $W_2$ ); con 0.2% de AP, se preparó una solución acuosa, manteniendo la mezcla en agitación continua para incorporar lentamente la emulsión primaria  $W_1/O$ , se determinó el pH de la emulsión y se utilizó NaOH (18%) para ajustar el pH a 7. Posteriormente, se homogeneizó a 1000 rpm por 10 min en un agitador Caframo (Mod. BDC6015, North Star PN 13C Ontario, Canadá). Una vez formada la emulsión  $W_1/O/W_2$  (60 mg<sub>proteína</sub> L<sup>-1</sup> emulsión  $W_1/O/W_2$ ), se observaron los glóbulos con el sistema analizador de imágenes (microscopio óptico Olympus BX 45 y cámara digital Olympus C-3030 Olympus optical CO Ltd, Japón; y Software Image-Pro Plus versión 4.5, Media Cybernetics, Inc.), seleccionando al azar un número determinado de glóbulos. El diámetro volumétrico medio ( $D_{3,0}$ ) se calculó para los glóbulos externos.

### *Biodegradación de MTBE*

Para determinar la actividad del consorcio microbiano entrampado en la emulsión múltiple  $W_1/O/W_2$ , se emplearon microcosmos que consistieron en botellas serológicas de 125 mL (por duplicado) selladas con válvulas Mininert (Sypelco, Sigma-Aldrich Canadá LTD, Oakville, ON, Canadá), en un agitador rotatorio (130 rpm, 30 °C). Cada botella contenía 10 mL de MM con el consorcio microbiano entrampado. El MTBE fue inyectado directamente en la fase líquida en cada botella usando una microjeringa para dar una concentración final de 1.46 mg<sub>MTBE</sub> por botella; durante la cinética de consumo de MTBE no hubo suministro de oxígeno a fin de evitar la volatilización de MTBE. La concentración de MTBE se cuantificó en la fase gaseosa de los microcosmos (*headspace*), por medio de cromatografía de gases (Perkin Elmer Instruments Autosystem XL, EU) con un detector FID (*flame ionization detector*), columna capilar, modelo HP-5 5% PH ME silicón de 30m, diámetro de 250  $\mu$ m y película de 0.25  $\mu$ m, con un flujo constante de 2 mL/min, con presión de 7.22 PSI y velocidad de 26 cm/s. Las condiciones

de trabajo fueron: temperatura de la columna, 100 °C; temperatura del detector, 220 °C; temperatura del inyector, 200 °C; flujo de hidrógeno de 40 mL/min; flujo de aire de 400 mL/min; y, como gas acarreador, Nitrógeno con flujo de 50 mL/min. Estos análisis se realizaron a las 24 h de inyectado el MTBE, y fueron monitoreados durante el periodo de incubación de los microcosmos. Se tomaron muestras de 100  $\mu$ L de la fase gaseosa del frasco (*headspace*), con una microjeringa para gases (VICI Precision Sampling, Inc. Pressure-Lok®, Alltech, EU) de 250  $\mu$ L de capacidad. La eficiencia de degradación de MTBE fue calculada usando las mediciones de MTBE en la fase gaseosa a lo largo del tiempo. Como regla, en un envase cerrado con volúmenes fijos de líquido y espacio de cabeza, el contenido de especies químicas volátiles en el sistema, la fase gaseosa es linealmente proporcional a su contenido total en el sistema. Así, el porcentaje de agotamiento de las especies químicas en la fase gaseosa es idéntico al porcentaje del agotamiento total sobre la biodegradación en la fase líquida (Moslemy *et al.*, 2002).

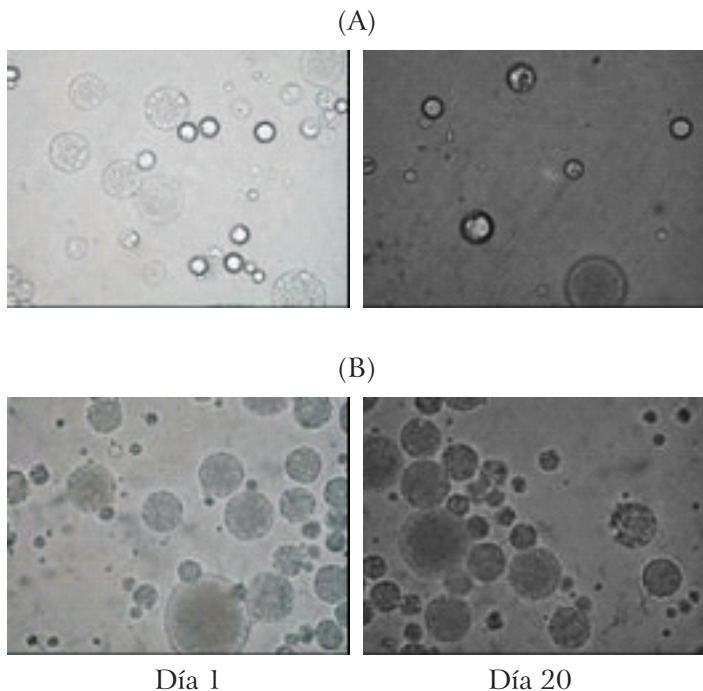
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

LA EMULSIÓN múltiple  $W_1/O/W_2$  abiótica formada con 0.2% de polímero sintético (AP) conservó un diámetro de glóbulo interno y externo uniforme durante el tiempo observado (20 días).

Se observó el efecto de la presencia de los microorganismos en la estabilidad y en la morfología de la emulsión múltiple  $W_1/O/W_2$  (figuras 1A y 1B). El  $D_{3,0}$  de la emulsión con microorganismos se incrementa de forma considerable ( $18.14 \pm 1.47 \mu\text{m}$ ) con respecto a la emulsión abiótica ( $9.41 \pm 1.09 \mu\text{m}$ ), aunque es casi el doble el incremento del glóbulo que se presenta por la presencia del consorcio; la emulsión es estable a lo largo del tiempo.

El ciclo observado en el experimento para el consumo de MTBE fue de 288 h (figura 2). La tasa de degradación de MTBE por el consorcio microbiano entrampado en la emulsión  $W_1/O/W_2$  fue de  $12.4 \pm 7 \text{ mg}_{\text{MTBE}} \text{g}_{\text{proteína}}^{-1} \text{h}^{-1}$  con una eficiencia de eliminación de MTBE de  $60.7 \pm 5.1\%$ . Los resultados obtenidos en este

FIGURA 1  
MICROFOTOGRAFÍAS DE LOS GLÓBULOS DE LAS  
EMULSIONES  $W_1/O/W_2$  FORMADAS CON AP.  
(A) EMULSIÓN TESTIGO EN AUSENCIA  
DEL CONSORCIO MICROBIANO;  
(B) EMULSIÓN CON EL CONSORCIO MICROBIANO

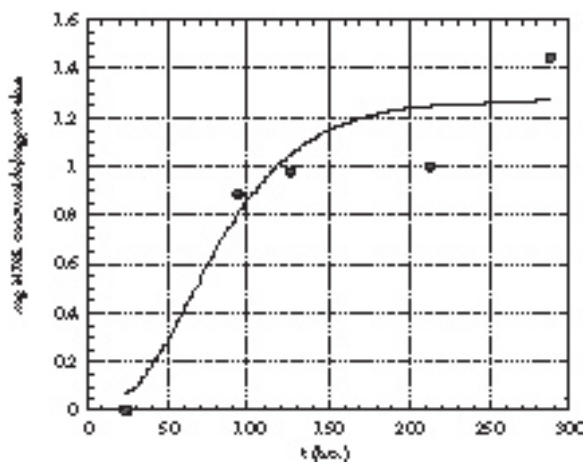


Fuente: Elaboración propia.

trabajo fueron similares a los encontrados por Morales *et al.* (2004) por cometabolismo de un consorcio microbiano con hexano, el cual presentó una velocidad de degradación de  $11.5 \text{ mg}_{\text{MTBE}}/\text{g}_{\text{proteína}} \text{ h}$ .

La capacidad de formular emulsiones múltiples estables con microorganismos entrampados es la clave para poder tener aplicaciones de biorremediación a mayor escala. El método aquí

FIGURA 2  
BIODEGRADACIÓN DE MTBE DEL CONSORCIO MICROBIANO  
ENTRAMPADO EN LA EMULSIÓN



Fuente: Elaboración propia.

utilizado y propuesto es simple, además, las emulsiones pueden ser producidas en equipos de mayor escala, y podrían tener potencial aplicación. Por otra parte, los materiales utilizados en la emulsión múltiple  $W_1/O/W_2$  pueden ser recuperados y reutilizados, con lo que disminuyen los costos operacionales y se aprovecha la inminente inestabilidad de la emulsión al separar los compuestos de la emulsión después del proceso de biodegradación.

## CONCLUSIONES

EL DIÁMETRO volumétrico medio  $D_{3,0}$  del glóbulo de la emulsión múltiple  $W_1/O/W_2$  obtenido con el consorcio microbiano se encuentra dentro del rango para su aplicación en la biorremediación de un acuífero contaminado ( $<50\mu m$ ).

Los resultados indicaron que la estabilidad de la emulsión formulada no es afectada con la presencia del consorcio entrampado en la emulsión  $W_1/O/W_2$ .

Finalmente, el estudio realizado en este trabajo contribuye a la futura aplicación de las emulsiones múltiples para el entrapamiento de un consorcio microbiano viable y que además conserva la actividad de degradación del MTBE. Este sistema sugiere una alternativa de aplicación potencial para el tratamiento de acuíferos contaminados con MTBE.

## AGRADECIMIENTOS

LOS AUTORES agradecen el soporte financiero de esta investigación al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) a través del convenio 45992/A-1.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALLOUCHE, J., E. Tyrode, V. Sadtler, L. Choplin, y J. Salager (2003), "Single-and two-step emulsification to prepare a persistent multiple emulsion with a surfactant-polymer mixture", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 42, núm. 17, pp. 3982-3988.
- CASSIDY, M.B., K.W. Shaw, H. Lee y J.T. Trevors (1997), "Enhanced mineralization of pentachlorophenol by  $\kappa$ -carrageenan-encapsulated *Pseudomonas* sp. UG30", *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 47, núm. 2, pp. 108-113.
- DAVIDSON, J.A. (1997), "MTBE Fate and transport –the latest data", *Workshop on fate, transport and remediation of MTBE-7<sup>th</sup> Annual West Coast Conference on Contaminated Soils and Groundwater*, del 10 al 13 de marzo, Mandalay Bay Resort, Oxnard, CA.
- y R. Parsons (1996), "Remediating MTBE with current and emerging technologies", *Proceedings of the API/NGWA 1996 Petroleum Hydrocarbons and Organical Chemicals in Groundwater: Prevention, Detection, and Remediation*, Houston, Texas.
- DICKINSON, E. (1992), *Introduction to Food Colloids*, Oxford, Oxford University Press.
- (1993), "Protein-polysaccharide interactions in food colloids", en E. Dickinson y P. Walstra, *Food colloids and polymers: stability and mechanical properties*, Cambridge, Reino Unido, Royal Society of Chemistry, pp. 77-93.

- (2003), "Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems", *Food Hydrocolloids*, vol. 17, núm. 1, pp. 25-39.
- FAYOLLE, F., J.-P. Vandecasteele y F. Monot (2001), "Microbial degradation and fate in the environment of methyl tert-butyl ether and related fuel oxygenates. A mini review", *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 56, núms. 3-4, pp. 339-349.
- FORTIN, N. Y., M. Morales, Y. Nakagawa, D.D. Focht y M.A. Deshusses (2001), "Methyl tert-butyl ether (MTBE) degradation by a microbial consortium", *Environmental Microbiology*, vol. 3, núm. 6, pp. 407-416.
- HAPPEL, A.M., E.H. Beckenbac, y R.U. Halden (1998), *An evaluation of MTBE impacts to California groundwater resources*. UCRL-AR-130897. Lawrence Livermore National Laboratory, Environmental Protection Department, University of California, Davis.
- HEI (1996), "The potential health effects of oxygenates added to gasoline. A review of the current literature", A especial report of institute's oxygenation evaluation committee (Health Effects Institute).
- JOHNSON, E.L. y M.R. Hyman (2006), Propane and *n*-Butane Oxidation by *Pseudomonas putida* GPo1", *Applied and environmental microbiology*, vol. 72, núm. 1, pp. 950-952.
- , C.A. Smith, K.T. O'Reilly y M.R. Hyman (2004), "Induction of Methyl Tertiary Butyl Ether (MTBE)-Oxidizing Activity in *Mycobacterium vaccae* JOB5 by MTBE", *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 70, núm. 2, pp. 1023-1030.
- KITAGAWA, T., Y. Nishikawa, J.W. Frankenfeld y N.N. Li (1977), "Wastewater treatment by liquid membrane process", *Environmental Science and Technology*, vol. 11, núm. 6, pp. 602-605.
- LEE S.-T., S.K. Rhee y G.M. Lee (1994), "Biodegradation of pyridine by freely suspended and immobilized *Pimelobacter* sp", *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 41, núm. 6, pp. 652-657.
- LI, N.N. (1968), *Separation hydrocarbon with liquid membrane*, US Patent 3,410,794, 12 de noviembre.
- LÓPEZ, A., I.G. Peña, M. Morales y S. Revah (2004), *Caracterización cinética y propagación de consorcios microbianos capaces de degradar metil ter-butil éter (MTBE)*, Comisión Nacional de Microbiología, México.
- MATSUMOTO, S. (1987), "W/O/W-type emulsions in non-ionic surfactants, science series", en M.J. Schick (ed.), *Nonionic surfactants: physical chemistry*, Marcel Dekker, 23, pp. 549-600.
- MCCLEMENTS, D.J. (1999), *Food emulsions. Principles, practice, and techniques*, CRC Press, EU, 378 pp.



- MORALES, M., J. Jan Velázquez E., S. Revah, U. González y E. Razo-Flores (2004), "Methyl tert-butyl ether biodegradation by microbial consortia obtained from soil samples of gasoline-polluted sites in Mexico", *Biotechnol Lett.*, febrero, vol. 6, núm. 4, pp. 269-75.
- MORMILE, M.R., S. Liu y J.M. Suflita (1994), "Anaerobic biodegradation of gasoline oxygenates: Extrapolation of information to multiple sites and redox conditions", *Environmental Science and Technology*, vol. 28, núm. 9, pp. 1727-1732.
- MOSLEMY P., S.R. Guiot y R.J. Neufeld (2002), "Production of size-controlled gellan gum microbeads encapsulating gasoline-degrading bacteria", *Enzyme and microbial Technology*, vol. 30, núm. 1, pp. 10-18.
- SALAGER, J.L. y A. Fernández (2004), "Surfactantes Catiónicos y otros", núm. 304PP, Laboratorio FIRP, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes, Mérida 5101, Venezuela.
- SHERMAN, P. (1968), *Emulsion Science*, Pergamon Press, Londres, pp. 332-334.
- SMIT, E., H. Lee, J.T. Trevors y J.D. Van Elsas (1996), "Interaction between a genetically engineered *Pseudomonas fluorescens* and bacteriophage OR2f in soil: effect of nutrients, alginate encapsulation, and the wheat rhizosphere", *Microb. Ecol.*, 31, pp. 125-140.
- SOSA-FRAGOSO, J. (2004), "Desarrollo de emulsiones múltiples W/O/W estables conteniendo colorantes hidro y lipo dispersables como precursores de microencapsulados", tesis de maestría, México, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
- TREVORS, J.T., J.D. Van Elsas, H. Lee y A.C. Wolters (1993), "Survival of alginate-encapsulated *Pseudomonas fluorescens* cells in soil", *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 39, núms., 4-5, pp. 637-643.
- US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1997), *Drinking water advisory: consumer acceptability advice and health effects analysis on methyl tertiary butyl ether (MTBE)*. EPA-822-F-97-008, Office of Water, US Environmental Protection Agency, Washington, D.C. 38.
- (1999), *Achieving Clean Air and Clean Water: the Report of the Blue Ribbon Panel on Oxygenates in Gasoline*, US Government Printing Office, EPA/420/R-99/021, Washington D.C., EU.
- WEIR S.C., S.P. Dupuis, M.A. Providenti, H. Lee y J.T. Trevors (1995), "Nutrient-enhanced survival of and phenanthrene mineralization by alginate-encapsulated and free *Pseudomonas* sp. UG14Lr cells in creosote-contaminated soil slurries", *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 43, núm. 5, pp. 946-951.



Cuarta parte

*Manejo integral del agua*



ERASMO FLORES VALVERDE,\* JUAN MANUEL POMARES,\*  
MARÍA RITA VALLADARES RODRÍGUEZ\*  
Y AGUSTÍN BREÑA PUYOL\*

## *Manejo integral del sistema hídrico del río Tlamanalco*

### INTRODUCCIÓN

SI PUDIÉRAMOS VACIAR en 100 cubetas toda el agua existente en el planeta, tendríamos 97 recipientes de agua salada, dos de congelada y solamente una sería de agua dulce para consumo de toda la humanidad.

Lo anterior nos adentra en un escenario dramático, pues si bien existen técnicas muy costosas y alternas para desalinizar los mares, el agua dulce es, por mucho, la principal fuente de abasto que tiene el ser humano. Esta preocupación aumenta al recordar un dato impactante ofrecido por el IV Foro Mundial del Agua, celebrado en México en el año 2005: de las 6,500 millones de personas que habitan el planeta, 21% carece de agua potable. Así, miles de millones de seres humanos no sólo sufren por la escasez del vital líquido, sino que se encuentran expuestos a enfermedades por la falta de higiene y, por ende, a muertes prematuras. Lo anterior es aún más lamentable cuando se informa que todos los días miles de niños menores de cinco años mueren en países del Tercer Mundo como resultado de enfermedades contraídas debido al consumo de agua contaminada.

Por otra parte, la evaluación de los costos y beneficios del mejoramiento del agua y del saneamiento a escala mundial, ela-

\* Profesores-investigadores del Área de Química, Dpto. de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Tel./Fax: 53 18 94 96, e-mail efv@correo.azc.uam.mx, vrnr@correo.azc.uam.mx

\* Participante externo en el Programa Sierra Nevada.

\* Profesor-Investigador del Departamento de Hidrología, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.

borada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el 2004, señala que de ampliar la red de distribución de agua potable, se presentarían beneficios económicos que, dependiendo de la región, oscilarían entre los tres y los 34 dólares por cada dólar invertido, esto porque el agua potable se traduciría en un menor número de padecimientos, lo que a su vez generaría más productividad de los individuos hacia su comunidad, pues se desplomaría la inasistencia al trabajo o la escuela a causa de enfermedades.

## ANTECEDENTES

UNO de los grandes problemas que se debe resolver se ha derivado del hecho de que a lo largo y ancho de México y de muchas partes del mundo, se han utilizado los ríos como cuerpos de descarga de aguas residuales municipales y, en muchos casos, aguas residuales industriales (figuras 1, 2 y 3).

FIGURA 1  
RÍO CONTAMINADO



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 2  
DESCARGAS DIRECTAS DE AGUAS RESIDUALES  
DOMÉSTICAS AL RÍO



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3  
DESCARGAS DIRECTAS DE AGUAS RESIDUALES  
INDUSTRIALES (TEXTILES) AL RÍO



Fuente: Elaboración propia.

Estas acciones han sido las causantes de que en la actualidad los cuerpos de agua (arroyos, riachuelos, ríos, etcétera), constituidos con agua de buena calidad en su nacimiento, aguas abajo sean punto de descarga de aguas residuales por lo que están contaminados en mayor o menor grado. Si se deseara resolver el problema hoy mismo, una solución sería pedir que ya no se realizaran las descargas mencionadas, lo cual implicaría el cuestionamiento de: ¿adónde se descargarían ahora? Como puede observarse, no es fácil solucionar esta cuestión, porque, para que se pueda exigir que una acción cese, se debe dar la alternativa de cómo resolver el problema. Por otra parte, en caso de que en estos momentos no se atienda a esta problemática, la tasa de la población crece y, por consiguiente, el volumen de aguas residuales descargadas es mayor, aunado a que la capacidad de carga de los cuerpos receptores, en la mayoría de los casos, disminuye así como su autodepuración por factores como: crecimiento urbano, tala inmoderada y sobreexplotación de los mantos acuíferos. Todo esto causa una contaminación cada vez mayor de dichos cuerpos hídricos.

## METODOLOGÍA

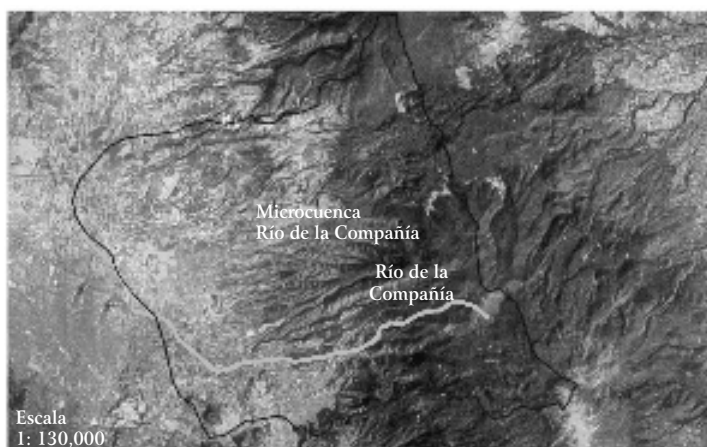
SE ELABORÓ el plan de trabajo, el cual consistió en las siguientes etapas.

- Etapa I. Hacer un reconocimiento del sistema en estudio, todo lo que puede apreciarse de sus alrededores y que sea de utilidad para el desarrollo del proyecto (figura 4).
- Etapa II. Seleccionar puntos de muestreo con la finalidad de obtener muestras representativas de los diferentes puntos del río que presumiblemente tienen variaciones significativas en la calidad del agua.
- Etapa III. Calendarizar los muestreos con la finalidad de obtener, hasta donde sea posible, muestras representativas a lo largo de un año.



- Etapa IV. Efectuar los muestreos que contempla la etapa anterior conforme a la Norma Mexicana NMX-AA-003.
- Etapa V. Efectuar en el laboratorio los análisis de dichas muestras conforme a la NOM-001 Semarnat-1996.
- Etapa VI. Tratamiento de datos.
- Etapa VII. Elaborar propuestas de remediación de las aguas de dicho cuerpo hídrico.

FIGURA 4  
UBICACIÓN DEL RÍO TLALMANALCO



Fuente: Elaboración propia.

### SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

LA SELECCIÓN de los puntos se hizo considerando gradientes en la calidad del agua inferidos mediante la visita de prospección a lo largo del río que comprende el área de estudio. Con el resultado de las observaciones de campo se seleccionaron siete puntos para la red de muestreo, los cuales se pueden ver en el croquis en la figura 5.

FIGURA 5  
UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

COMO ejemplo de los parámetros de calidad del agua y los resultados de sus concentraciones determinadas en los puntos de muestreo, se presentan en los cuadros 1 a 3 las obtenidas para la estación Hacienda Zavaleta durante la primera campaña de muestreo (17 de septiembre del 2005). Mientras que en las gráficas 1 a 4 se muestran, para todas la estaciones, los resultados de las concentraciones de los parámetros indicadores de contaminación orgánica (DBO y DQO) y por grasas y aceites para las dos campañas de muestreo.

CUADRO 1  
INFORME DE RESULTADOS DE LA MUESTRA DEL PUNTO DE  
HACIENDA ZAVALETA. INFORMACIÓN GENERAL

Razón social	Proyecto	Fecha del análisis
	"Manejo integral del sistema hídrico de Sierra Nevada"	27 de septiembre de 2005
Giro	Descarga núm.	Fecha de muestreo
Programa universitario de investigación	2 de 6	17 de septiembre de 2005
Identificación de la muestra		Código de la muestra
Hacienda Zavaleta		170905121D2006261R

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio	Límites máximos permisibles		
				Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Temperatura (°C)	–	–	17.5	N.S.I.	N.S.I.	40°C (313°K)
pH (unidades de pH)	–	–	7.41	N.S.I.	5.5 – 10	5.5 – 10
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	–	–	–	N.S.I.	N.S.I.	N.S.I.
Grasas y aceites (mg/L)	–	–	01.00	15	25	–
Gasto (l/s)	–	–	–	N.S.I.	N.S.I.	N.S.I.

Fuente: Elaboración propia.

## CUADRO 2

### RESULTADOS DE CONCENTRACIONES DE LOS PARÁMETROS OBLIGATORIOS DE CALIDAD DEL AGUA PARA EL PUNTO DE LA HACIENDA ZAVALITA

Parámetros	Resultado	Límites máximos permisibles	
		promedio diario	Unidades
Arsénico	* < a 0.0007	0.2	mg/L
Cadmio	* < a 0.027	0.2	mg/L
Cianuros	* < a 0.004	2	mg/L
Cobre	* < a 0.024	4	mg/L
Cromo	* < 0.005	1	mg/L
Mercurio	* < a 0.0004	0.01	mg/L
Níquel	* < a 0.047	2	mg/L
Plomo	* < a 0.022	0.5	mg/L
Zinc	* < a 0.030	20	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno	* 21.33	150	mg/L
Sólidos suspendidos totales	* 16.0	125	mg/L
Sólidos sedimentables	* 0.3	2	mg/L
Fósforo total	* 1.29	30	mg/L
Nitrógeno total	* 1.848	60	mg/L
Coliformes fecales	* 14300	2000	NMP/100 ml
Huevos de helminto	* N.D.	≤ 1	unidades/L

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 3  
RESULTADOS DE CONCENTRACIONES DE LOS  
PARÁMETROS ADICIONALES DE CALIDAD DEL AGUA  
PARA EL PUNTO DE LA HACIENDA ZA VALETA

Parámetros	Resultado	Límite máximo	Unidades
Nitrógeno de nitritos	< a 0.005	N.S.I	mg/L
Nitrógeno de nitratos	0.168	N.S.I	mg/L
Nitrógeno de Kjendalh	1.68	N.S.I	mg/L
Sustancias activas al azul de metileno	< a 0.05	N.S.I	mg/L
Demanda química de oxígeno	374.40	800	mg/L

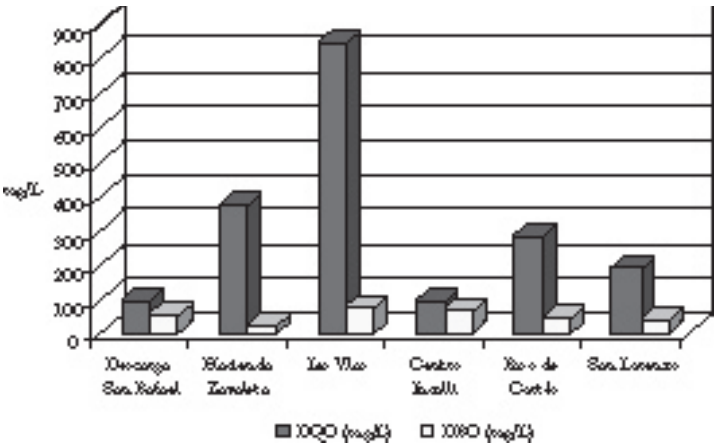
Fuente: Elaboración propia.

Nomenclatura:  
< M.L.D.: Menor que el límite de detección  
N.D.: No Detectado  
p.p.: Promedio ponderado  
\*: Parámetros normados (NOM-001-Semarnat-1996)

N.A: No aplica  
N.S.I.: No se indica.  
L.M.P: Límite máximo permisible.

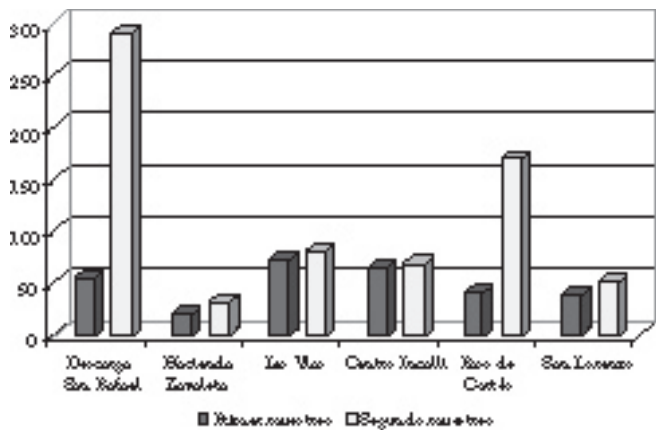
P: Presente  
A: Ausente.  
S.F: Sin flujo

GRÁFICA 1  
VARIACIÓN ESPACIAL DE LA DEMANDA QUÍMICA  
DE OXÍGENO (DQO) Y DEMANDA BIOQUÍMICA  
DE OXÍGENO (DBO)



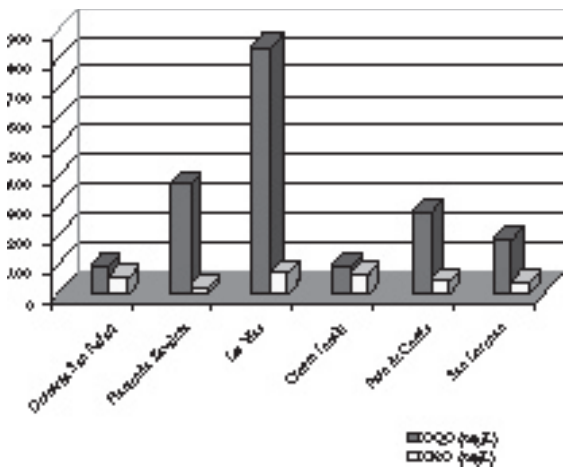
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICA 2  
VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA DBO



Fuente: Elaboración propia.

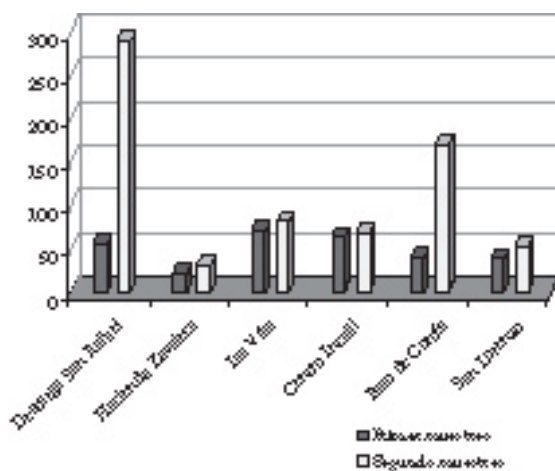
GRÁFICA 3  
VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA DQO



Fuente: Elaboración propia.

## GRÁFICA 4

## VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE GRASAS Y ACEITES



Fuente: Elaboración propia.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

LA CONCENTRACIÓN de metales tiene un comportamiento similar en las dos muestras y, conforme al cuadro 1, puede observarse que la mayoría de ellos registra valores por debajo del límite de detección. Este hecho debe tomarse en cuenta en el momento de decidir el tratamiento que se le debe dar al sistema hídrico en estudio. En cuanto a los valores de DQO y DBO, es interesante señalar que la DBO en general está dentro de norma, sin embargo, la DQO presenta valores relativamente altos. Aunque este parámetro no está contemplado en la norma, se puede observar que la relación DQO/DBO es mucho mayor que uno. Este hecho nos permite deducir que, si la contaminación es de tipo orgánico, ésta es poco biodegradable, siendo otra opción que existan especies inorgánicas susceptibles de oxidarse y que contribuye al valor relativamente alto de DQO. Dicho escenario es poco usual cuando se estudian aguas residuales municipales únicamente. Probablemente esto tenga una explicación, ya que en el punto de muestreo

de Hacienda Zavaleta hay industrias pequeñas cuyo giro es la producción de láminas de cartón. Llama la atención que el punto de muestreo de Hacienda Zavaleta registró valores altos de DQO y los valores más bajos en grasas y aceites.

## PROPUESTAS

CONFORME al grado de avance del proyecto, aún con resultados parciales y tomando en cuenta que a estas alturas se conocen mejor los alrededores del cuerpo hídrico en estudio, se pueden mencionar propuestas iniciales para la remediación del río Tlalmanalco.

- Cancelar las descargas de aguas residuales directas al río.
- Convencer a las autoridades, municipales, estatales y federales, y a la propia población, para que a partir de ahora cada casa que se construya ya no pueda ni deba descargar las aguas residuales al río, ya que si esto continúa, aunado a la tasa de crecimiento, el río perderá pronto su capacidad de autodepuración y morirá.
- Diseñar plantas de tratamiento aerobias y/o anaerobias aguas abajo, ya que se sabe que en los puntos Hacienda Zavaleta y San Lorenzo el municipio de Tlalmanalco cuenta con grandes superficies de terreno comunal.
- Al hablar de un manejo integral del sistema hídrico, es necesario planear el uso que se le dará al agua tratada, situación que hasta ahora, en un buen número de plantas de tratamiento de aguas, el agua tratada es desechada nuevamente al alcantarillado o a un cuerpo nacional y se vuelve a contaminar.
- La infiltración al subsuelo del agua tratada es uno de los puntos que se consideran en la presente investigación.

## CONCLUSIONES

DERIVADAS del desarrollo de la presente investigación se generan las siguientes necesidades.

- a) Continuar el seguimiento de la calidad del agua del río con la finalidad de observar el impacto que causan principalmente las descargas de aguas residuales de las empresas.
- b) Trabajar con los actores correspondientes en cada caso para que las propuestas se puedan llevar a cabo.
- c) Estudiar nuevas propuestas que incidan directamente en la población, por ejemplo, desarrollo de proyectos productivos.

## BIBLIOGRAFÍA

- APHA, AWWA, WPCF (1992), *Métodos normalizados para análisis de aguas potables y residuales*, Madrid, Ediciones Díaz de Santos.
- METCALF, E. (2003), *Wastewater engineering treatment and reuse*, México, McGraw-Hill.
- NOM-001-ECOL-1996 (2003), Norma Oficial Mexicana, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, *Diario Oficial de la Federación*.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (2004).
- POPULAR MECHANICS (1999), *Cruzada por el oro azul*, México.
- ROMERO, R.J.A. (1999), *Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización*, México, Alfaomega.



ERASMO FLORES VALVERDE,\* JUAN MANUEL POMARES,•  
MARÍA RITA VALLADARES RODRÍGUEZ\*  
Y AGUSTÍN BREÑA PUYOL★

## *La infiltración del agua en la Cuenca de México*

### INTRODUCCIÓN

LA CUENCA DE MÉXICO (CM), en el transcurso de sus etapas geológicas quedó cerrada al carecer de salida natural hacia el mar. El agua producto de la precipitación pluvial mantuvo su equilibrio hidráulico mediante la elevada evapotranspiración existente en la zona. La estacionalidad de esta precipitación provocaba el incremento de los niveles de sus lagos en la época de lluvia, los cuales descendían a su nivel más bajo al final de la temporada de estiaje.

Es posible distinguir claramente el escenario de dos historias para nuestra CM: la primera etapa, que corresponde al equilibrio en la interacción del hombre con el ecosistema, y la segunda, que abarca el rompimiento de este equilibrio, con el inicio de la explotación desmedida de los recursos naturales de toda índole, empezando con el agua.

En un inicio los primeros poblados, para hacer habitable la región, debieron estudiar el medio, fundamentalmente sus particularidades ecológicas, y generar tecnologías para el aprovechamiento de los recursos naturales que les permitieran la supervivencia. En ese terreno, se puede decir que desarrollaron las tecnologías apropiadas, ya que, de acuerdo con la información escrita (códices,

\* Profesores-investigadores del Área de Química, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Teléfono Fax: (55) 5318-9496 [efv@correo.azc.uam.mx], [vrmr@correo.azc.uam.mx].

• Participante externo en el Programa Sierra Nevada.

★ Profesor-investigador del Departamento de Hidrología, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.

informes, cartas, entre otros) con que se cuenta, es posible deducir que controlaron los problemas hidráulicos y agrícolas generados por las particularidades de la región.

En el ramo hidráulico, construyeron una compleja red de bordos, compuertas y múltiples canales bien localizados, que sirvieron además como sus más eficientes vías de comunicación entre los varios pueblos de la zona, y que a su vez permitieron regular la gran masa de agua generada en la estación de lluvias mediante la infraestructura señalada, que servía como embalse de regulación de las aguas acumuladas en la estación de lluvias, y lograron incluso, con su acertada tecnología, la separación de las aguas dulces, indispensables para sus actividades vitales, de las inevitables aguas saladas, en una región con alta evaporación y sin salida al mar (figura 1).

FIGURA 1  
VISTA DEL ACUEDUCTO DE CHAPULTEPEC



Fuente: Delegación Miguel Hidalgo, DF.

En el ramo agrícola crearon las chinampas, antecesoras de la hidroponía. Las chinampas hasta la fecha asombran al mundo por su alta productividad, lo cual se logró mediante islotes flotantes de tierra fértil, las que por esta característica se mantenían a salvo de inundaciones, derivadas de las variaciones estacionales.

En la segunda etapa, la llegada de los españoles dio inicio a la devastación ecológica, cuyas posibles causas quizá se debieron a la falta de interés de los conquistadores por el conocimiento de las tecnologías generadas por la cultura prehispánica, lo cual condujo en un inicio a la destrucción de la ciudad prehispánica. La devastación transformó drásticamente el entorno al terminar con las obras de ingeniería hidráulica, instrumentos de control necesarios para el manejo del agua y la conservación del equilibrio ecológico.

Este tipo de acciones en contra del ecosistema provocó una reacción adversa e inmediata de la naturaleza ya que la falta de mecanismos de control para los elevados volúmenes de agua de lluvia estacionales, provocaron graves inundaciones que por años se mantuvieron sin posibilidades de control.

Ante esta situación, en la época de la Colonia se inició la construcción de canales de desagüe para tratar de drenar los lagos y ríos de la zona, hacia la cuenca del Pánuco. Estas medidas fueron continuadas por los gobiernos independientes y aún en la actualidad, con la operación de obras costosas de desalojo de las aguas, aunque el problema tan sólo se ha resuelto de manera parcial, ya que año tras año ocurren inundaciones, particularmente acentuadas en la región oriente de la zona metropolitana.

Por otra parte, el crecimiento de la población trajo como consecuencia la demanda de agua potable. En los inicios del siglo pasado, para el abasto del agua potable se propició el alumbramiento de aguas subterráneas, mediante el bombeo de pozos profundos, cuya agua provenía de los entonces ricos mantos acuíferos de la CM.

Aunado a la excesiva extracción del agua, como consecuencia inherente del crecimiento de la población, se ha venido realizando, con graves efectos de minimización de su infiltración, el sellado de los suelos y, por consiguiente, ha desaparecido el área natural de recarga de los mantos acuíferos, sumándose a lo anterior la destrucción de las áreas arboladas que circundaban la región y propiciaban la infiltración.

Estas acciones combinadas y la cada vez mayor extracción de agua aceleraron el descenso de los niveles de los mantos acuíferos,

que ha provocado el hundimiento de la ciudad y la consecuente desaparición de innumerables manantiales y riachuelos de la región, que en otros tiempos fueron fuentes de agua potable para la población, a través de acueductos que perviven como mudos testigos de la crisis actual.

Ante el persistente crecimiento de la población en el Valle de México, en la década de 1960 dio inicio un nuevo proyecto para abastecer de agua potable a la población: la introducción de agua potable de la Cuenca del alto río Lerma, seleccionada por ser la más próxima al DF, lo cual le permitió ser la más viable. Para llevar a cabo este proyecto, debieron realizarse obras de construcción y operación de pozos profundos que permitieran obtener el agua del subsuelo de esa región. La también irracional y desmedida explotación de esta cuenca ha provocado el descenso de los niveles de estos mantos acuíferos, síntoma de la sobreexplotación y agotamiento de los mismos, lo que ha reducido la producción de agua de esta zona y ha encarecido la operación, al requerirse nuevas perforaciones para extraer el agua a mayor profundidad y, en consecuencia, con un mayor costo.

Ante el abatimiento de los mantos acuíferos de la Ciudad de México y el continuo incremento de la demanda de agua potable, durante la década de 1980 se construyeron costosas obras en tres etapas para importar el agua, entonces de la Cuenca del Cutzamala. Sin embargo, a pesar de la importación del agua de las cuencas del Lerma y del Cutzamala, no ha sido posible reducir la extracción de agua de la CM, por el contrario, aumenta cada vez más y actualmente 69% del agua potable que consumimos proviene de los mantos acuíferos.

## PROPUESTAS

LA COMUNIDAD científica y los especialistas en el tema, así como las autoridades administrativas, han propuesto diversas y variadas soluciones, que van desde continuar la tendencia de importar el líquido vital de diversas cuencas externas, hasta reanudar las etapas programadas para incrementar la importación del agua del

río Cutzamala; sin embargo, en este último caso, las poblaciones ahí asentadas, conocedoras de los efectos adversos para su entorno por estas medidas y de la necesidad de solucionar su propia demanda, se oponen al proyecto de seguir con la extracción del agua de su cuenca, por lo cual es posible prever que será difícil proseguir con las etapas siguientes que se habían programado en el proyecto original.

Otra propuesta que se ha planteado se refiere a la importación de agua de otras cuencas, como las de los ríos Amacuzac, Apatlaco y Tecolutla; sin embargo, las obras de ingeniería y sus costos de operación para tal fin resultarían bastante elevados debido a la gran distancia que los separa del DF y a las condiciones geográficas de los sitios de extracción y de la propia CM, además de los costos adicionales por los tipos de tratamientos específicos para potabilizar esta agua de acuerdo con su calidad. Cabe mencionar que, en los costos del trasvase de agua, es necesario considerar aquellos derivados del desalojo de aguas residuales, ya que el volumen de ésta se incrementaría por la nueva aportación recibida.

## OTRO ESCENARIO

EN LOS últimos años, se ha planteado una propuesta alternativa que desafortunadamente ha sido soslayada por las autoridades administrativas, y que consiste en lograr el manejo autosuficiente de la Cuenca de México.

Como parte de las acciones a seguir para llevar a cabo esta propuesta, se encuentra la construcción de depósitos para la captación y almacenamiento del agua de lluvia, después de un sencillo tratamiento, cuya finalidad es ampliar el ciclo de utilidad del agua, al ser utilizada en servicios cuya calidad de agua tratada lo permita, como son las instalaciones sanitarias, riego de áreas verdes, alimentación de invernaderos, lavado de ropa, limpieza de inmuebles de empresas e industrias y otras aplicaciones.

La construcción de depósitos o presas a cielo abierto ofrece una gran dificultad, debido a la falta de espacios disponibles en

la ciudad para tales fines, por causa de la sobrepoblación de la Zona Metropolitana, que hace casi inexistentes los espacios verdes y otros que pudiesen ser los más adecuados para estos propósitos.

La captación del agua de lluvia en casas-habitación o en las unidades habitacionales disminuye su viabilidad masiva, debido a los costos que implica no sólo la construcción de estos aljibes, que podrían ser parte importante de la solución de la problemática del abastecimiento del agua potable, sino la infraestructura que se requeriría para este propósito, como lo son un nuevo sistema de tuberías, depósitos del agua de lluvia tratada y un sencillo sistema de tratamiento para este tipo de agua. Las obras de instalación del sistema de aprovechamiento del agua de lluvia implicarían necesariamente la remodelación de las estructuras con las que actualmente cuentan las casas-habitación, lo cual plantea la problemática de falta de recursos económicos de la mayoría de las familias para adecuar sus casas-habitación a este sistema de aprovechamiento del agua de lluvia.

En esta propuesta de aprovechamiento del agua de lluvia, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda (Seduvi) podría desempeñar un papel central, al proporcionar el financiamiento de las obras de construcción que permitan la adecuación de las casas y unidades habitacionales para que “cosechen el agua de lluvia”, que a corto plazo se vería reflejado en un beneficio para el erario del gobierno, al requerir de la inversión de menos recursos para dotar a la población de agua potable de la red, ya que en esas casas se “cosecharía el agua de lluvia”, aunque cabe destacar que esta propuesta de la cosecha de lluvia (sustentada en el proyecto del ingeniero Gerardo Cruickshank García) es limitada y controlada por los cambios estacionales, puesto que es aplicable únicamente durante la temporada de lluvia, siendo preciso señalar que no se pretende que sea la solución total, sino que es una iniciativa medular que forma parte de un conjunto de propuestas que constituyen un Plan de Manejo Sustentable del Agua en la Cuenca de México.

La problemática del abasto de agua en la CM se ve agravada al contar con una ciudad habitada por una sociedad con escasa

cultura ambiental, por lo cual es explicable que ésta desconozca el costo real del agua potable que recibe al abrir la llave mágica que le provee del vital líquido.

Esta problemática conduce a una gran cantidad de ciudadanos que disponen de agua potable de la red municipal a realizar un mal manejo de ésta, ya que el dispendio se explica por la falta de reflexión sobre el “valor verdadero” que tiene el líquido vital (su valor económico y su valor como recurso natural dentro del ciclo hidrológico, que es la plataforma de la vida). Generalmente, los ciudadanos que no obtienen fácilmente el agua potable desarrollan la capacidad de administrar su uso (cuando la consiguen), y aplican la reutilización de este recurso natural de manera intuitiva, al usar el agua del lavado de ropa para limpiar el patio y los pisos de la casa, y al final riegan las macetas con esa agua. Estas actividades para ahorrar agua son una de las múltiples acciones que han tenido que realizar.

Resulta claro que es necesario cubrir la falta de información de la población con respecto a las obras de ingeniería necesarias para el abastecimiento del agua potable en la Ciudad de México, así como sus altos costos: económicos, sociales y de afectación de los ecosistemas, que conducen a la población a adoptar el tipo de conductas señaladas. En este sentido, es preciso destacar que los medios de comunicación (televisión, radio y medios impresos y electrónicos), las instancias gubernamentales, como la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), Comisión Nacional del Agua (Conagua), la Secretaría de Educación Pública (SEP), las secretarías de Ecología y de Cultura de los gobiernos estatales, así como las instituciones educativas públicas y privadas, desempeñan un papel determinante en el vacío sobre educación ambiental que favorece la conducta adversa del ciudadano hacia el ecosistema.

Es necesario señalar que, para almacenar el agua de lluvia, contamos con un gran “tanque natural” que es el subsuelo, peligrosamente vacío en la actualidad. El subsuelo cuenta con todo el espacio requerido para el almacenamiento del agua, además de que para infiltrar el agua, no se requiere de costosas infraestruc-

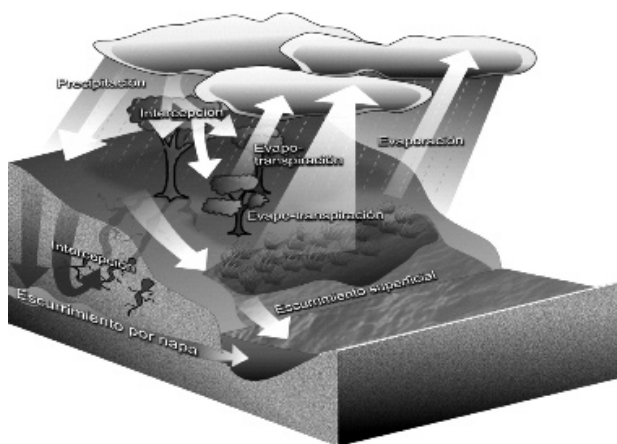
turas ni de altos precios de mantenimiento, pues se cuenta con técnicas de bajo costo para este fin, por lo cual es posible proponer al subsuelo como el mejor almacén de agua de la CM. Con la aplicación de esta propuesta, se resolverían simultáneamente problemas como el de los hundimientos del suelo, las inundaciones cíclicas durante la época de lluvias, así como la disminución de la onerosa operación del desalojo del agua de lluvia de la cuenca.

Por otra parte, con esta medida se solucionaría el grave problema que representa la amenaza del resquebrajamiento y fisura de la capa arcillosa constituida por el acuitardo, que resguarda los mantos acuíferos de la contaminación.

### INFORMACIÓN A TOMARSE EN CUENTA

LOS DATOS que a continuación se presentan, obtenidos de publicaciones diversas de la Conagua, proporcionan las bases para reflexionar de manera responsable en la realización de esta propuesta (figura 2).

FIGURA 2  
BALANCE HIDROLÓGICO



Fuente: Carmona, Y. G., 2007.



En el cuadro 1, se aprecia que, con la infiltración de los escurrimientos superficiales, el déficit de agua se podría reducir hasta en 8 por ciento.

CUADRO 1  
BALANCE HIDROLÓGICO DE LA CUENCA  
DEL VALLE DE MÉXICO  
(m<sup>3</sup>/año)

Precipitación anual	6,969'456,000
Pérdidas por evapotranspiración	5,234'976,000
Infiltración o recarga al acuífero	693'772,000
Sobreexplotación	666'218,000
Escurrimientos superficiales	567'648,000

Fuente: Breña, P.A., *Gestión integral del agua en la Cuenca del Valle de México*, UAM, 2005.

En el cuadro 2, se complementa la panorámica de la necesidad creciente de abasto de agua.

CUADRO 2  
CONSUMO DEL AGUA EN EL VALLE DE MÉXICO

Población	Consumo por persona (l)		Consumo área metropolitana (m <sup>3</sup> )	
	Día	Año	Día	Año
Millones				
18	300	109,000	5'400,000	1,971'000,000

Fuente: Breña, P.A., *Gestión Integral del agua en la Cuenca del Valle de México*, UAM, 2005.

De acuerdo con los parámetros clásicos de estimación de agua residual (80%), se tendría una disponibilidad de 1,576 millones de m<sup>3</sup> de aguas residuales para su tratamiento e infiltración, cifra que representa 236% de la sobreexplotación actual, sin considerar el volumen que podrían aportar los escurrimientos superficiales para recarga de mantos acuíferos por su infiltración.

El cuadro 3 confirma la dependencia correspondiente a 69%, del cada vez más agotado manto acuífero de la Cuenca del Valle de México (CVM).

CUADRO 3  
ORIGEN DEL AGUA CONSUMIDA ANUALMENTE  
EN EL VALLE DE MÉXICO

<i>Acuíferos de la zona (m³)</i>	<i>Acuíferos de cuencas externas (m³)</i>
1,359'990,000	611'000,000

Fuente: *Diario Oficial de la Federación*, 31 de enero de 2003, México.

Sobre el particular, los datos disponibles indican que actualmente las fugas existentes en la red de agua potable son equiparables al volumen de importación de las cuencas externas.

Aunque la mayor parte de esta agua alimenta a la CM, no resulta justificable la desatención que ha persistido en el mantenimiento y reparación en las redes de distribución del agua potable, pues la alta erogación del traslado del agua potable de otras cuencas, así como los costos del tratamiento para su potabilización, se ven como un esfuerzo desperdiciado, al no atender de manera adecuada la problemática, por lo que ha sido posible observar la falta de un manejo planeado del recurso hídrico en la CM y se manifiesta la sobreexplotación del agua con la presencia de los hundimientos diferenciales (cuadro 4).

CUADRO 4  
ESTADO DE LOS ACUÍFEROS DE LA ZONA METROPOLITANA

<i>Extracción</i>	<i>Infiltración</i>	<i>Sobre extracción</i>
1,359'990,000	693'772,000	666'218,000

Fuente: *Diario Oficial de la Federación*, 31 de enero de 2003, México.

ANÁLISIS DE ACCIONES REALIZADAS

HASTA la fecha, las acciones llevadas a cabo para la infiltración son tibias medidas, como la limitada construcción de las llama-

das “tinas ciegas”, que almacenan el agua para su infiltración, utilizando pequeñas depresiones o pósitos a cielo abierto.

Estas instalaciones tiene espacios muy limitados en la cuenca, ya que dada su localización superficial, sólo pueden construirse en zonas rurales. Por otra parte, por sus características constructivas, limitan el volumen a infiltrar.

La legislación actual ha condicionado a las nuevas construcciones en la zona metropolitana a la instalación de mecanismos de infiltración del agua de lluvia, lo que se cumple mediante la construcción de tanques de concreto armado, incluso por las propias delegaciones. Estos tanques de elevado costo tienen una limitada eficiencia, ya que su contacto con los perfiles permeables del suelo es escaso, lo que limita su capacidad de infiltración.

#### OTRA VISIÓN EN LAS ACCIONES A EMPRENDER

SIENDO la infiltración una de las mayores posibilidades de resolver el problema del agua en la CM, y considerando la imposibilidad de llevarla a cabo de forma natural en una gran superficie, de la cual no se dispone, se han analizado otras tecnologías, de las cuales se ha mostrado un importante binomio: una aceptable eficiencia combinada con un bajo costo.

La tecnología aludida la constituyen tanques subterráneos denominados “geotanques de infiltración de agua al subsuelo”. Estas obras son instalaciones pequeñas y sencillas que captan el agua de lluvia en tanques subterráneos y que, dadas sus características de diseño, tienen una gran superficie de contacto con los diferentes perfiles que componen el subsuelo y aceleran la infiltración en las capas permeables mediante la generación de un gradiente de presión hidráulica.

Esta presión provoca el aceleramiento horizontal del flujo de agua a través de estas capas permeables, formadas en los diferentes periodos geológicos por los que atravesó la CVM.

La presión y el contacto directo de los geotanques, con estas capas permeables anulan el efecto de las capas impermeables o

semipermeables que limitan la infiltración vertical, que en forma natural se daría en un suelo despejado, ya que estas capas impermeables saturan los perfiles superiores y provocan escorrentías sobre la superficie del suelo.

La infiltración provocada por los geotanques se manifiesta porcentualmente mayor en forma horizontal y amplía a su vez el área de infiltración vertical, substituyendo en buena medida la infiltración natural. Al incrementarse el área de infiltración vertical, se propicia la alimentación de los mantos acuíferos, ya que lógicamente es esta última, la que finalmente depositará el agua en ellos.

Las condiciones geológicas de los suelos, que definen su permeabilidad, en el caso de la CM, no permiten pensar en grandes construcciones para la infiltración sino en pequeñas obras, como las aludidas, que deben ser técnica y convenientemente distribuidas. Estas obras ya han comprobado su eficacia en varios lugares de la CM, aun en zonas de difícil infiltración como el acuitardo, en donde han resuelto graves problemas de inundación.

La propuesta para la utilización de esta tecnología es que la infiltración al subsuelo de la CM se inicie por la parte sur de la cuenca, en las estribaciones del complejo montañoso formado por la Sierra Nevada, el volcán Chichinautzin, el Ajusco y el Monte de la Cruces, que por sus condiciones geológicas constituyen, la zona con mayor potencial de recarga.

Consideramos saludable también realizar estos trabajos en las zonas ubicadas sobre el acuitardo, que actualmente padecen de graves inundaciones durante el periodo de lluvias, y que aun cuando su aportación al acuífero sería de muy bajo impacto, se resolvería este problema que afecta severamente a la población de esa zona.

El otro recurso para incrementar la infiltración de agua al subsuelo lo constituye el tratamiento del agua residual hasta niveles terciarios y su infiltración hacia el subsuelo, ya que su tratamiento hasta niveles potables lo proporcionaría el mismo suelo, como actualmente sucede, a través de su lento recorrido hasta el manto acuífero.

Aun cuando a la fecha sólo se tiene un proyecto de norma para regular la infiltración al acuífero, el agua proveniente de plantas de tratamiento con niveles terciarios cumpliría con esta norma proyectada, siempre y cuando el tiempo de infiltración al acuífero no resulte menor a seis meses.

Esta propuesta conlleva eliminar las tendencias actuales que privilegian la construcción de macroplantas, ya que en la práctica, las supuestas economías de escala en que se sustentan resultan ficticias, toda vez que los volúmenes de agua que requieren primero su abastecimiento y posteriormente su distribución con fines de reuso, hacen inminente la construcción de grandes y costosas obras, que por su elevado monto, en varios casos no han sido construidas, y en otros, las enormes plantas de tratamiento, por falta de esta infraestructura, operan a niveles muy por debajo de su capacidad de diseño, y el agua tratada con costos elevados, termina nuevamente en los drenajes sanitarios y en cuerpos nacionales.

Es recomendable legislar que todas las plantas que se construyeran, y aun las ya construidas, cuenten con un mecanismo de infiltración, como el propuesto, ya que aun con la mejor programación es imposible ajustar los volúmenes demandados de agua tratada con la capacidad de tratamiento de la planta.

Para ilustrar lo anterior, mencionaremos que el agua tratada para riego de jardines en la temporada de lluvias no es demandada, por lo que termina en los drenajes, precisamente en esta época, sumándose a las aguas que causan inundaciones.

En el caso de la construcción de las plantas de tratamiento, es importante que sean pequeñas o medianas. Se deben construir preferentemente en forma subterránea, para aprovechar la superficie de la construcción, utilizando de preferencia una combinación de procesos anaeróbicos y aeróbicos que elimine la producción de lodos contaminantes además de la reducción sustantiva del consumo de energía.

Con las plantas aeróbicas, normalmente importadas, independientemente de su alto consumo energético en las plantas

bien diseñadas y operadas, la calidad de su agua efluente es buena, sin embargo, su alta producción de lodos contaminantes, en cierta medida, solamente cambia la problemática de los efectos de la contaminación del agua residual, por los efectos de la contaminación de los lodos que producen, efecto del que ya se quejan y buscan medidas europeos y estadounidenses.

## PLANEACIÓN

LA INFILTRACIÓN del agua en la CM, requiere de una planeación que debe empezar, con los estudios técnicos que determinen las unidades de infiltración. Los estudios aludidos deben ser convenientemente sistematizados, debiéndose realizar de tipo preliminar, de tipo cuantitativo, estudios avanzados y estudios específicos.

### *Estudio preliminar*

Determina el marco geológico en que ocurre el movimiento del agua subterránea, los volúmenes de extracción de aguas subterráneas, la posición de los niveles de agua y las direcciones de flujo.

### *Estudio cuantitativo*

Determinación del conocimiento de la geometría y estructura de los acuíferos, los volúmenes de entrada y salida de agua subterránea al manto acuífero y la disponibilidad y calidad del agua.

### *Estudio avanzado*

Además de precisar la disponibilidad del agua y sus variaciones en un intervalo de tiempo, permite elaborar y calibrar un modelo matemático, involucrando también parámetros físicos, con objeto de analizar las condiciones actuales y predecir el comportamiento del manto acuífero frente a diversas políticas de operación.

*Estudios específicos*

## Caracterización del sitio desde el punto de vista hidrológico

- Topografía (pendientes)
- Precipitación
- Escurrimiento

## Caracterización del sitio desde el punto de vista hidrogeológico

- Profundidad del nivel estático.
- Posición del sitio respecto al sistema de flujo, es decir, si está dentro de algún flujo local o regional.
- Tipos de materiales que se presentan en el subsuelo.
- Familias de fracturas y fallas.
- Porosidad y permeabilidad de los materiales del subsuelo.
- Distribución tridimensional de los materiales del subsuelo (geofísica).
- Atenuación natural del sitio.
- Definir la capacidad de intercambio catiónico.
- Contenido de materia orgánica.

La realización de estos estudios, la disponibilidad de recursos económicos y la decisión política, marcarán los tiempos de realización de las obras de infiltración, en la que será fundamental la participación activa de la sociedad, municipios y delegaciones enclavadas en la CM.

Como actividades que garanticen la eficiencia en la operación del programa y particularmente para proteger la calidad del acuífero, será indispensable la realización de un programa de monitoreo permanente, para establecer los controles adecuados. Este programa deberá contar con el personal y la infraestructura apropiada, como laboratorios y pozos profundos de observación, para fundamentar acciones que permitan aplicar las medidas adecuadas en tiempo y forma, para la operación correcta del programa.

Resulta importante recalcar que para llevar a buen término estas acciones, se requiere no sólo de recursos económicos, sino de la acción comprometida de la sociedad y del gobierno.

En una reflexión final, y tomando unilateralmente sólo aspectos mercantilistas, debe calcularse cuánto costarían las acciones de emergencia para una crisis por falta de agua a una población de más de 18 millones de seres humanos, ya que hasta la fecha nadie sabe el monto del agua existente en el acuífero y, por consiguiente, la duración del abastecimiento del agua que actualmente consumimos y que tiene varios siglos de almacenada; asimismo, se debe plantear qué problemas acarrearía al resto del país la macrocefalia que social, política y económicamente representa la zona metropolitana.

## CONCLUSIÓN

DADAS las condiciones que han dado lugar al deterioro cada vez más marcado de la CM –siendo uno de los principales problemas la sobreexplotación de la cuenca, toda vez que la relación extracción/recarga cada vez es mayor– en el presente trabajo se enfatiza la importancia de recargar la cuenca mediante la infiltración de agua de lluvia y agua tratada aplicando la tecnología de geotanques de infiltración del agua al subsuelo, considerando que la tecnología mencionada ya tiene aplicación exitosa en algunas zonas de la Cuenca de México.

## BIBLIOGRAFÍA

- CUSTODIO, E. y M.R. Llama (1993), *Hidrología subterránea*, España, Editorial Omega.
- FLORES, E., M.R. Valladares, A. Breña y J.M. Pomares (2007), *Tratar el agua residual: una necesidad*, México, UAM y FIDAM.
- SEMARNAT Y CONAGUA (2005), *Estadísticas del agua en México*, México.



MARÍA RITA VALLADARES RODRÍGUEZ,\*  
ERASMO FLORES VALVERDE•  
Y FELIPE LÓPEZ SÁNCHEZ\*

## *Plan integral de saneamiento del Río Chico de los Remedios (Naucalpan)*

### INTRODUCCIÓN

LA PROBLEMÁTICA de la contaminación del Río Chico de los Remedios da inicio aproximadamente en 1940, cuando un gran número de industrias se instalan en la periferia de la Ciudad de México, siendo el Municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México, una región sumamente atractiva para la instalación de plantas industriales, debido a que presentaba características ventajosas que favorecieron el cambio de uso de suelo, llevándole de las parcelas a los asentamientos humanos (la gran mayoría irregulares). Entre las principales características de la región que favorecieron esta transformación podemos señalar:

- 1) La cercanía al DF.
- 2) La abundante disponibilidad de recursos naturales (agua, suelo, madera, entre otros), además de la existencia en la región de materiales para construcción (como arena y grava).
- 3) Disponibilidad de recursos humanos con cierto grado de conocimientos técnicos calificados.
- 4) El contar con un gobierno estatal dispuesto a otorgar facilidades para la gestión administrativa que propiciara la creación de empresas.
- 5) Ausencia de leyes de protección al ambiente en esa época.

\* Profesores-investigadores del Área de Química, Departamento de CBI, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, teléfono y Fax: (555) 318-9496 [vrmr@correo.azc.uam.mx, efv@correo.azc.uam.mx].

• Profesor-investigador en la Maestría en Ingeniería Ambiental ESIA, IPN, Zacatenco.

Debido a los factores señalados, la polución industrial tuvo un nicho propicio para su desarrollo, que a su vez trajo consecuencias negativas imprevistas: la contaminación de cuerpos de agua, suelo y aire.

Actualmente el Río Chico de los Remedios es receptor de descargas de aguas residuales de tipo industrial y municipal, y presenta zonas con elevados niveles de contaminación fisicoquímica y bacteriológica, aunque no se han encontrado valores considerables de metales pesados disueltos, de acuerdo con los resultados obtenidos en los estudios de la calidad del agua del río, practicados en el Laboratorio de Análisis y Tratamiento de Aguas de la UAM, Unidad Azcapotzalco.

Entre los problemas de mayor consideración que se presentan, se encuentra el riesgo de contaminación de uno de sus manantiales tributarios, ubicado en Rincón Verde y localizado a medio kilómetro del tiradero a cielo abierto “Rincón Verde” (actualmente fuera de servicio). Hasta el momento, los análisis practicados al agua del manantial han mostrado que la migración de lixiviados provenientes del tiradero no han contaminado el agua del manantial del río San Mateo, cuyo cauce se une aguas abajo al del Río Chico de los Remedios, por lo cual es necesario determinar la ruta de migración que posibilite evitar la contaminación de mantos freáticos.

El segundo problema de mayor importancia se localiza en la región que comprende la zona industrial, en donde se encuentran instaladas industrias de diversos giros: textiles, del ramo alimenticio, metal-mecánico y galvanoplastia principalmente.

La tercera región de aporte de contaminantes se constituye por las zonas urbanas en donde se localizan asentamientos irregulares, y en donde la falta de planeación urbana ha provocado el hacinamiento de viviendas, como puede observarse en la zona denominada “El Torito”.

En este marco ambiental en el que se circunscribe la problemática del Río Chico de los Remedios, se requiere de una alternativa que resuelva la problemática de la contaminación del río, mediante un plan integral que contenga especificaciones técnicas

de saneamiento, con la incorporación de propuestas de carácter preventivo mediante éste se pretende mantener puro el río y mejorar el ecosistema del cual forma parte. Hasta el momento, esta propuesta se encuentra en la etapa de conclusión de la caracterización de las aguas del río, así como de los lixiviados del tiradero “Rincón Verde”.

Las aguas residuales municipales e industriales que descargan al Río Chico de los Remedios le confieren al agua un nivel de calidad que rebasa los límites máximos permisibles que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996, en los siguientes parámetros: grasas y aceites, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ), demanda química de oxígeno (DQO), coliformes fecales y huevos de helminto.

El objetivo general de esta investigación es elaborar un plan integral para el saneamiento del Río Chico de los Remedios, mediante el estudio de los contaminantes que afectan la calidad del agua del río, el control de las fuentes generadoras de estos contaminantes, la aplicación de políticas de conservación apoyadas en el marco normativo que promuevan la participación de la comunidad del municipio (colonos, industriales, estudiantes, trabajadores y autoridades) para garantizar su buen funcionamiento a lo largo del tiempo.

## CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

### *Población*

Hasta el año 2000, el municipio contaba con 858,711 habitantes, de los cuales 442,670 eran mujeres y 416,041 hombres. La densidad de la población era de 5,730 habitantes por kilómetro cuadrado.

### *Economía*

El Estado de México es uno de los principales estados de la República Mexicana, debido a su aporte económico. Ocupa el segun-

do lugar a escala nacional en dotación de empleos y cuenta con 380,988 unidades económicas (INEGI, 2004).

### *Hidrología*

El Municipio de Naucalpan de Juárez pertenece a la Región Hidrológica 26, Pánuco (H26), la cual se encuentra ubicada al centro noreste de la República Mexicana. Es considerada como una de las más importantes de México, por el cuantioso volumen de sus corrientes superficiales.

La Cuenca (D) llamada Río Moctezuma, forma parte de esta región hidrológica y pertenece casi en su totalidad al Estado de México.

### *Geología*

El Municipio de Naucalpan de Juárez pertenece a la Región Geológica número 2, a la cual pertenecen Jilotzingo, Huixquilucan y Atizapán de Zaragoza. Esta región cuenta con materiales extraíbles para la industria de la construcción, como lo son la arena y la grava; por su colindancia con el DF lo abastece de estos materiales en la zona noroeste, ya que su producción asciende a 1'770,500 m<sup>3</sup>, 50,800 m<sup>3</sup> de tepetate y 34,900 m<sup>3</sup> de cantera, siendo esta última la de menor producción.

### *Clima*

El clima del Municipio de Naucalpan de Juárez es templado, y se le considera mesotérmico, debido a que la temperatura media de los meses más cálidos y más fríos no es muy alta ni muy baja. Se considera que el intervalo de variación de temperatura oscila entre 6.5 °C como mínima, a 22 °C como máximo para los meses cálidos; para los meses más fríos, el intervalo de fluctuación de la temperatura corresponde a -3 °C a 18 °C.

El régimen térmico medio anual tiene un intervalo de 12 °C a 18 °C. Este clima cubre cerca de 61.5% de la superficie del estado.

El clima que cobija este suelo propicia la presencia de bosques de oyamel, pino, encino y mixtos; también favorece la aparición de pastizales.

## DESARROLLO

El estudio, se dividió en las siguientes etapas:

- Visitas de reconocimiento en campo.
- Realización de estudios que proporcionen información referente a:
  - a)* La calidad del agua del río
  - b)* Caudales
  - c)* Principales descargas residuales industriales
  - d)* Asentamientos humanos
  - e)* Zonas industriales
  - f)* Epidemiología de la población
- De acuerdo con la necesidad de obtener la información mencionada, la investigación se ha planteado de tipo experimental y de análisis documental.
- El análisis experimental a realizar consiste en el muestreo del agua del río para establecer su calidad y así determinar los parámetros que intervienen directamente en la contaminación, los cuales son cuantificables mediante procedimientos estandarizados de toma de muestras y análisis de laboratorio (figura 1).
- Los resultados obtenidos del análisis de laboratorio se estudian y se interpretan.
- Con respecto a la contaminación que pudiese aportar el tiradero controlado Rincón Verde, se plantea estudiar la composición de los lixiviados, así como su dinámica, el tipo de suelo y la permeabilidad.
- El estudio correspondiente al análisis documental se desarrolla con la finalidad de encontrar las variables de carácter social, económico, administrativo y de legislación, entre otras, que permitan establecer las estrategias para formular el Plan Integral de Saneamiento.

FIGURA 1  
RÍO CHICO DE LOS REMEDIOS A SU PASO  
POR LOMAS VERDES



Fuente: Elaboración propia.

### *Técnicas analíticas*

Los métodos de muestreo y análisis de laboratorio son técnicas normalizadas, con protocolos basados en la normatividad mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996).

### *Muestreo de las aguas de río*

El muestreo se inició en enero del año 2005, con una periodicidad mensual para el punto 7, ya que es el punto final del tramo en estudio del Río Chico de los Remedios, cuyo caudal en este punto ya viene enriquecido con los aportes del Río San Mateo y otros arroyos tributarios, como el San Miguel.

Los puntos 1 a 6 (cuadro 1) han sido monitoreados trimestralmente, a excepción del punto 4 que ha sido muestreado con mayor periodicidad, por ser un importante indicador del presumible nivel de

afectación de la calidad del agua del río, debido a la contaminación que pudiese causar la presencia del tiradero controlado Rincón Verde.

*Plan de muestreo*

Se preparan muestras compuestas en cada punto, para lo cual se consideran 24 horas de trabajo, por lo cual se toman en total seis muestras simples por punto de muestreo, con intervalos de tiempo entre cada toma de muestra simple de tres a cuatro horas.

*El aforo* se realiza con las técnicas de *área transversal* o *velocidad contra tiempo*, según sean las condiciones del sitio de muestreo.

Las mediciones de parámetros de campo que se realizan a cada muestra simple son: temperatura, pH y conductividad. El equipo empleado para las mediciones de campo es un equipo calibrado con soluciones de referencia certificadas por el Centro Nacional de Metrología (Cenam), modelo Conductronic PC 18 (figura 2).

Las muestras simples son preservadas químicamente de acuerdo con lo establecido en la normatividad mexicana, y guardadas en hieleras hasta su transporte al laboratorio.

*Puntos de muestreo*

Los puntos de muestreo se seleccionaron con base en la división hidrológica de la zona de estudio, así como a características observables del agua (cuadro 1).

CUADRO 1  
PUNTOS DE MUESTREO

<i>Sitio de muestreo</i>	<i>Clave del punto de muestreo</i>
Tenantongo D1	1
Remedios Chico D2	2
San Mateo anterior D3	3
Rincón Verde D4	4
El Colorado D5	5
La Colorada D6	6
Lomas Verdes D7	7

Fuente: Elaboración propia.

Los análisis de laboratorio se realizaron en el *Laboratorio de Análisis y Tratamiento de Aguas UAM-Azcapotzalco*, perteneciente al Área de Química del Departamento de Ciencias Básicas, cuyo responsable es el investigador Erasmo Flores Valverde.

FIGURA 2

MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO EN EL PUNTO 3  
DE MUESTREO, MANANTIAL DEL RÍO SAN MATEO



Fuente: Elaboración propia.

### *Análisis del acuífero*

La norma establece como indicativo de la presencia de lixiviados en acuíferos el estudio comparativo de la calidad del agua de un pozo ubicado aguas arriba y otro aguas abajo contra una muestra de agua de referencia. La calidad del agua de referencia estará definida por las características del agua nativa. Este estudio se realiza conforme a la norma NOM-127-SSA1-1994.



### *Análisis de suelo*

La naturaleza del suelo (figura 3) desempeña un papel determinante en la infiltración de los lixiviados hacia sus capas interiores, en donde es posible que pueda descender hasta depositarse en los mantos acuíferos y los contamine, por lo cual se considera de gran utilidad realizar estudios de la capacidad de intercambio catiónico y de la permeabilidad (para evaluar el riesgo ambiental por la presencia de lixiviados).

### *Pruebas de geotecnia*

Las pruebas de geotecnia aportan información de gran utilidad para el conocimiento del desplazamiento de los lixiviados en el subsuelo, para lo cual es necesario obtener información sobre propiedades tales como porosidad, humedad y estabilidad de taludes, entre otras.

## RESULTADOS

EN ESTE trabajo se muestran parte de los resultados obtenidos del avance de esta investigación. Éstos comprenden estudios de campo (cuadro 2) y análisis de laboratorio de la caracterización del agua residual (cuadros 3a y 3b).

Los cuadros 3a y 3b muestran los resultados del análisis de agua del punto 7 de muestreo Río Chico de los Remedios (Lomas Verdes).

CUADRO 2

MEDICIÓN DE CAMPO DEL PUNTO D7 (LOMAS VERDES), ENERO 26 DE 2006

Número de muestra	Parámetro	Valor obtenido	Hora	*Límite máximo permisible (valor instantáneo)
1	pH	6.50		5 a 10
	Temperatura (°C)	11.6	6:30	40
2	Conductividad (µS/cm)	936		No se indica
	pH	8.1		5 a 10
3	Temperatura (°C)	16.4	10:30	40
	Conductividad (µS/cm)	1,115		No se indica
4	pH	7.22		5 a 10
	Temperatura (°C)	18.5	14:30	40
5	Conductividad (µS/cm)	1,783		No se indica
	pH	8.40		5 a 10
6	Temperatura (°C)	17.7	18:30	40
	Conductividad (µS/cm)	1,720		No se indica
7	pH	5.1		5 a 10
	Temperatura (°C)	14.60	22:30	40
8	Conductividad (µS/cm)	995		No se indica
	pH	4.4		5 a 10
9	Temperatura (°C)	14.10	02:30	40
	Conductividad (µS/cm)	1,302		No se indica

Fuente: Valladares, R.M.R, tesis “Plan integral de saneamiento del Río Chico de los Remedios (tramo Rincón Verde-Lomas Verdes)” , IPN, México, 2007.

CUADRO 3A

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE AGUA DEL PUNTO 7 DE MUESTREO

RÍO CHICO LOS REMEDIOS (LOMAS VERDES), 2006

PARÁMETROS											
pH	T	Conductividad	Grasas	As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn	Cu
(unidades pH)	(°C)	(µS/cm)	y aceites (mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
5.5-10	40	N.S.I.	15	0.2	0.2	1.0	0.01	2.0	0.5	20	4
<div> <div>*[límite máximo permisible]</div> <div>→</div> <div>Mes</div> </div>											
Enero	7.06	16.0	1,262.5	69.78 < a 0.0007 < a 0.027 < a 0.005 < a 0.0004 < a 0.047 < a 0.022 < a 0.030 < a 0.024 < 0.05							
Febrero	7.50	15.0	1,098.8	38.26 < a 0.0007 < a 0.027 < a 0.005 < a 0.0004 < a 0.047 < a 0.022 < 0.352 < 0.024 < 0.05							
Marzo	7.24	19.7	1,024.7	75.25 < a 0.0007 < a 0.027 < a 0.005 < a 0.0004 < a 0.047 < a 0.022 < 0.0302 < 0.024 < 0.08							
Abril	7.40	21.27	1,026	84.47 < a 0.0007 < a 0.027 < a 0.005 < a 0.0004 < a 0.047 < a 0.022 < 0.040 < 0.026 < 0.10							
Mayo	6.90	20.20	1,010	45.4 < a 0.0007 < a 0.027 < a 0.005 < a 0.0004 < a 0.047 < a 0.022 < 0.030 < 0.024 < 0.05							

CUADRO 3A (Continuación)

P A R Á M E T R O S													
	pH (unidades pH)	T (°C)	Conductividad (µS/cm)	Grasas y aceites (mg/L)	As (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Hg (mg/L)	Ni (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)	Cu (mg/L)	SAAM mg/L)
*límite máximo permisible → Mes													
Junio	5.5-10	40	N.S.I.	15	0.2	0.2	1.0	0.01	2.0	0.5	20	4	N.S.I.
Julio	6.8	21.9	955	71.87	< a 0.0007	< a 0.027	< a 0.005	< a 0.0004	< a 0.047	< a 0.022	< 0.030	< 0.024	< 0.05
Agosto	7.32	19.9	644.8	17.10	< a 0.0007	< a 0.027	< a 0.005	< a 0.0004	< a 0.047	< a 0.022	< 0.030	< 0.024	< 0.05
Septiembre	6.82	21.0	806.3	18.17	< a 0.0007	< a 0.027	< a 0.005	< a 0.0004	< a 0.047	< a 0.022	< 0.030	0.033	< 0.05
Octubre	6.57	20.4	1,094	30.23	< a 0.0007	< a 0.027	< a 0.005	< a 0.0004	< a 0.047	< a 0.022	< 0.030	< 0.024	< 0.05
Noviembre	9.11	21.5	980	71.25	< a 0.0007	< a 0.027	< a 0.005	< a 0.0004	< a 0.047	< a 0.022	< 0.030	0.027	< 0.05
Diciembre	7.72	19.0	916	50.01	< a 0.0007	< a 0.027	< a 0.005	< a 0.0004	< a 0.047	< a 0.022	< 0.030	0.022	< 0.05
	7.41	19.9	1,005.17	49.81	< a 0.0007	< a 0.027	< a 0.005	< a 0.0004	< a 0.047	< a 0.022	< 0.030	0.090	< 0.05

N.S.I. No se indica  
N.D. No detectado  
\* NOM-001-SEMARNAT-1996  
Fuente: Valladares, R.M.R. Tesis "Plan integral de saneamiento del Río Chico los Remedios (tramo Rincón Verde-Lomas Verdes)". IPN, México, 2007.

CUADRO 3B

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE AGUA DEL PUNTO 7 DE MUESTREO

RÍO CHICO LOS REMEDIOS (LOMAS VERDES), 2006

P A R Á M E T R O S												
	Demanda química de oxígeno (mg/l)	Nitrógeno kjendhal (mg/l)	Nitrógeno de nitratos (mg/l)	Nitrógeno de nitritos (mg/l)	SST (mg/l)	SS (ml/l)	Cianuros (mg/l)	Fósforo total (mg/l)	Coliformes fecales [NMP/100]	Huevos de helmineto unidades/l	Nitrógeno Total (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
	800	N.S.I.	N.S.I.	N.S.I.	125	2	2	30	2000	≤ 1 ]	60	150
* Límite máximo permisible →												
Mes												
Enero	752.0	42.56	0.172	< a 0.005	360	5.0	0.005	7.74	230,000	2	31.3	128.0
Febrero	166.0	25.57	0.633	0.064	20.0	0.2	0.005	4.04	56,000	1	26.267	28.0
Marzo	753.0	33.52	0.215	< a 0.005	96.0	2.5	< 0.005	8.48	105 × 103	N.D.	33.73	380.6
Abril	200.8	33.25	0.232	< 0.005	14.0	0.8	< 0.005	8.65	27 × 104	N.D.	33.49	218.0
Mayo	304	20.10	0.20	< 0.005	40.0	0.3	< 0.005	7.22	104,000	1	30.26	59.50
Junio	640	30.06	0.26	< 0.005	44.0	0.4	< 0.005	7.48	93,000	N.D.	30.32	201.0
Julio	160.6	36.71	0.13	< 0.005	4	2	< 0.005	6.53	24'000,000	3	36.84	20.30

CUADRO 3B (Continuación)

P A R Á M E T R O S										
Mes	Demanda química de oxígeno (mg/l)	Nitrógeno ammoniacal (mg/l)	Nitrógeno de nitratos (mg/l)	Nitrógeno de nitratos (mg/l)	SST (mg/l)	SS (ml/l)	Cianuros (mg/l)	Fósforo total (mg/l)	Coliformes fecales [NMP/100]	Huevos de helminto unidades/l
	800	N.S.I.	N.S.I.	N.S.I.	125	2	2	30	2000	≤ 1 ]
										60
										150
Agosto	289	30.86	0.14	< 0.005	20	0.1	< 0.005	3.93	179,000	N.D.
Septiembre	240.6	24.47	0.55	< 0.005	24	0.1	< 0.005	4.08	990,000	1
Octubre	212.7	38.18	0.20	< 0.005	48	0.5	< 0.005	6.44	15'000,000	2
Noviembre	231	28	0.33	< 0.005	98	0.5	< 0.005	4.28	3,040 × 106	3
Diciembre	290	6.72	1.14	< 0.005	76.6	2.5	< 0.005	3.6	4'000,000	2

NSI: No se indica

ND: No detectado

\* NOM-001-SEMARNAT-1996

Fuente: Valladares, R.M.R., Tesis "Plan integral de saneamiento del Río Chico los Remedios (tramo Rincón Verde-Lomas Verdes)", IPN, México, 2007.

## CONCLUSIONES

DE ACUERDO con los resultados, se observa que la contaminación del agua del río rebasa en determinados momentos los límites máximos permisibles que establece la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, que se ha tomado como referencia para este estudio. Los cuadros 2 y 3 presentan los resultados del estudio de la caracterización del agua en el punto de monitoreo D7, que corresponden a la zona de estudio con el mayor caudal, debido a que al llegar a este punto el río ya recibió los aportes de sus principales tributarios; este punto de muestreo marca el límite de la zona de estudio.

Los parámetros de la calidad que han rebasado la normatividad en determinadas ocasiones son: grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, coliformes fecales y huevos de helminto, aunque, como se ha señalado estos parámetros no han tenido este comportamiento constante.

Se propone el saneamiento del río mediante la aplicación de un *plan integral de saneamiento*, en el cual se considera como objeto de estudio *el sistema*, constituido por:

- 1) El río
- 2) La población
- 3) El entorno (factores bióticos y abióticos)
- 4) Las políticas de manejo del ecosistema establecidas por las autoridades responsables (contenidas en el Plan de Desarrollo Municipal y en el Estatal)
- 5) La normatividad establecida en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, y reglamentos que de ésta se derivan

Se considera que tanto el paisaje como el tiradero de Rincón Verde (figura 3) –transformado actualmente en relleno sanitario–, las fábricas, las escuelas, las casas-habitación, el comercio formal e informal y las empresas de servicios son parte importante del entorno. Este enfoque difiere de las propuestas tradiciona-

les, que plantean el saneamiento de los ríos y demás cuerpos de agua como una acción correctiva y temporal, sin considerar la aplicación de estrategias preventivas y/o correctivas para el control de las *fuentes generadoras* de la contaminación del agua que descargan a dichos cuerpos.

FIGURA 3

FOTOGRAFÍA DEL ANTERIOR TIRADERO A CIELO ABIERTO  
RINCÓN VERDE ACTUALMENTE ACONDICIONADO  
COMO RELLENO SANITARIO



Fuente: Elaboración propia.

El manejo de una visión vertical ha conducido a los responsables de la toma de decisiones a emprender únicamente acciones correctivas, como la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, acción aislada y sin planeación, carente de políticas para el reuso y el manejo del agua. Esto no soluciona el problema, ya que la población crece y las fuentes generadoras de aguas residuales industriales se multiplican al incrementarse la actividad productiva para satisfacer las necesidades que demanda la población, por lo cual, al poco tiempo, la capacidad de la planta de tratamiento instalada es insuficiente. En estas



circunstancias, si se pretende tratar tan sólo el volumen máximo del caudal de agua residual para el que se diseñó la planta, el resto del agua residual llegará sin tratamiento al río, aunque si la intención es tratar el volumen total de agua residual (rebasando la capacidad depuradora de la planta de tratamiento), el resultado esperado es obtener agua tratada de mala calidad. En ambos casos, el agua que se descargue a los cuerpos de agua no podría cumplir (en algunos de sus parámetros) con la normatividad correspondiente (NOM-001-SEMARNAT-1996), lo que provocará la contaminación de los cuerpos de agua, como lo son los ríos, que de esta manera verían rebasada su capacidad de autodepuración natural. Este escenario es el que se ha reproducido a lo largo del país. Por ello, en este proyecto se propone la aplicación de un conjunto de acciones para el saneamiento del río, tanto preventivas como correctivas, que pretenden constituir un PLAN INTEGRAL DE SANEAMIENTO que pueda mantenerse a lo largo del tiempo, con la participación de la comunidad del municipio, apoyada en el marco normativo y diseñado con bases científicas.

## BIBLIOGRAFÍA

- BURBANO, D.J. (1997), *Desarrollo sostenible para América Latina y el Caribe*, Ingeniería y Ciencias Ambientales (Femisca), año 9, núm. 33, México.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (2004), *Cuadernos Estadísticos*, México.
- JIMÉNEZ, C.B. (2001), *La contaminación ambiental en México*, México, Limusa.
- LEGORRETA, J., *El agua y la Ciudad de México*, México, Universidad Autónoma Metropolitana.
- LUDEVID, A.M.A. (1997), *El cambio global en el medio ambiente*, Barcelona, Mocambo.
- NOM-001-ECOL-1996 (2003), Norma Oficial Mexicana, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, *Diario Oficial de la Federación*.

- NOM-127-SSA1-1994 (2000), Norma Oficial Mexicana, de salud ambiental, agua para uso y consumo humano. *Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. PNUMA (2000), *Perspectivas del medio ambiente mundial*, Nairobi, Mundi Prensa.
- ROMERO, R.J.A. (1999), *Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización*, México, Alfaomega.

ICELA D. BARCELÓ QUINTAL,\* ABDUL KHALIL GARDEZI,•  
SERGIO ROSAS DE ALVA,\* ANNE L. BUSSY BEAURAIN,\*  
HUGO SOLÍS CORREA,\* EDGAR LÓPEZ GALVÁN,\*  
PEDRO ÁVILA PÉREZ,\* CELIA OLIVERA MARTÍNEZ\*  
Y YARA RAMÍREZ QUIRÓS\*

## *La cuenca alta del río Lerma y la presa José Antonio Alzate: un estudio integral*

### INTRODUCCIÓN

**T**OLUCA, CAPITAL DEL Estado de México, es una ciudad activa, con una importante producción agrícola y un acelerado crecimiento urbano-industrial. Presenta la problemática de que sus mantos acuíferos están siendo sobreexplotados y al mismo tiempo se contamina el río Lerma, el principal de la zona (INEGI, 1994), debido a la descarga de aguas residuales urbanas y a las descargas industriales localizadas en el corredor Toluca-Lerma. Algunas de estas descargas reciben tratamiento en la planta tratadora de aguas negras Reciclagua, que se localiza en los límites de Toluca para inmediatamente después ser vertidas al río Lerma. Este río se encuentra en condiciones sépticas durante todo el año y es utilizado como un colector público de aguas residuales, por lo que se pierden los signos de vida acuática (Barceló, 2000; Ávila, 2001). Dentro de los desechos antropogénicos que alcanza la zona donde se encuentra la presa José Antonio Alzate, los meta-

\* Profesores-investigadores del Área de Química y Fisicoquímica Ambiental, Depto. C.B.I., Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, teléfono y fax: (52) 55-5318 9360 [leemp@correo.azc.uam.mx].

• Colegio de Postgraduados, *Campus* Montecillo, 56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México, teléfono: 59595 2020.

\* Instituto Tecnológico de Toluca, Departamento de Estudios de Posgrado, Tel: 72 22 08 72 24.

\*ININ, Gerencia de Ciencias Ambientales, teléfono: 01 53 29 72 36.

\*CCRECRL, Conjunto Sedagro, 1er. Piso, Edif. Principal, Metepec Estado de México, Tel. 01 722 2322664.

les pesados tienen un lugar aparte, ya que su presencia no es evidente a simple vista. Estos metales, utilizados en procesos industriales y emitidos al ambiente, alteran los sistemas acuáticos en los que son atrapados y acumulados debido a la dinámica de sedimentación.

Desde 1990 la cuenca del alto Lerma es considerada como uno de los cuerpos de agua más contaminados del Estado de México. Esto ha generado que su saneamiento sea uno de los objetivos prioritarios del gobierno del Estado de México, lo cual se traduce en un enorme interés por trabajos que generen información relacionada con el efecto y comportamiento de los contaminantes en la zona. Son numerosas las industrias que descargan sus aguas residuales en el río Lerma, las cuales efectúan actividades económicas diversas. También, este río recibe alta carga orgánica por los aportes de aguas residuales municipales, y de sus ríos tributarios, residuos de fertilizantes y plaguicidas. Presenta gran cantidad de material sedimentable altamente contaminado, que por arrastre es introducido a la presa José Antonio Alzate. La contaminación de este río ha provocado una grave alteración de la biota de la presa. Dentro de los desechos antropogénicos que transporta el río Lerma están los metales pesados en sus formas disueltas; éstos participan junto con el calcio, magnesio, sodio y potasio a la fuerza iónica y por lo tanto, a la conductividad, que posteriormente, relacionados con la gran variedad de aniones presentes, la cantidad de oxígeno disuelto, el pH, la temperatura y el CO<sub>2</sub> disuelto, inducen a que el agua adquiera características agresivas o incrustantes, según varíen los diferentes parámetros físico-químicos enunciados (Barceló *et al.*, 1998a; Barceló, 2005). Además, la presencia de las diferentes especies químicas que pueden formar los cationes y aniones y las condiciones agresivas o incrustantes, al acumularse en el embalse, entrarán mediante los diferentes procesos de coagulación, floculación y decantación a formar parte de los propios sedimentos.

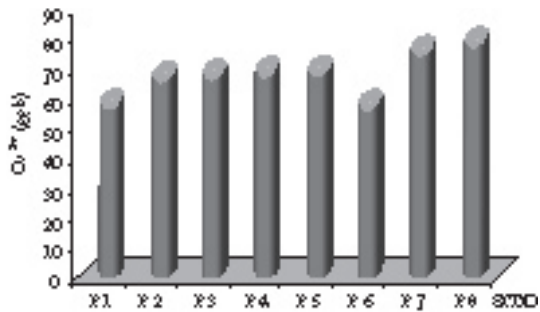
## PERSPECTIVAS DE SOLUCIÓN

ESTE proyecto establece una propuesta integral para el estudio del mejoramiento, por un lado de la calidad del agua de la presa mediante el tratamiento de sistemas lagunares, el cual sería complementado por medio de humedales, que permitirían a su vez en un futuro la introducción de biota, la estética del medio y la restitución de la calidad de santuario de aves migratorias, y por otro, el mejoramiento de los suelos agrícolas que rodean la presa mediante procesos de fitorremediación. Para llegar a esta propuesta, se diseñó el proyecto con tres líneas.

*Diagnóstico de la calidad del agua*

Se enfoca a la determinación primeramente de la contribución de las diferentes fuentes antropogénicas y naturales de los contaminantes en la cuenca alta del río Lerma. Los análisis de concentraciones totales de contaminantes en el agua o sedimento no bastan para predecir o evaluar el impacto ambiental de éstos, debido a que, en mayor proporción, se encuentran asociados a materia suspendida o sedimentos tanto en formas mineralizadas como fuertemente unidos a residuos orgánicos, de forma que no están directamente disponibles para la biota, pero pueden ser movilizados por procesos fisicoquímicos o biológicos. Se puede establecer un seguimiento de la contaminación en un sistema hídrico por medio de estudios de flujos disueltos, distribución (especiación) química (Barceló *et al.*, 1998a; Ávila-Pérez *et al.*, 1999) en agua (Barceló *et al.*, 1999; Barceló *et al.*, 2000) y sedimentos (Barceló *et al.*, 1998b; Barceló *et al.*, 2005), biodisponibilidad, bioacumulación o toxicidad. En las figuras 1, 2 y 3, se presentan estudios de la concentración disuelta de metales, como Cr, Cu y Pb, en varios puntos del río Lerma en el Estado de México, en estiaje del año 2005, como caso de ejemplo. En la tabla, junto a las figuras, se indican los sitios y sus claves con las que se representan las gráficas 1, 2 y 3.

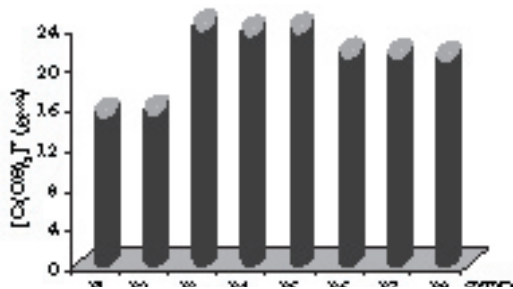
GRÁFICA 1  
VARIACIÓN DEL COBRE EN EL AGUA DE VARIOS SITIOS  
DEL RÍO LERMA EN EL ESTADO DE MÉXICO



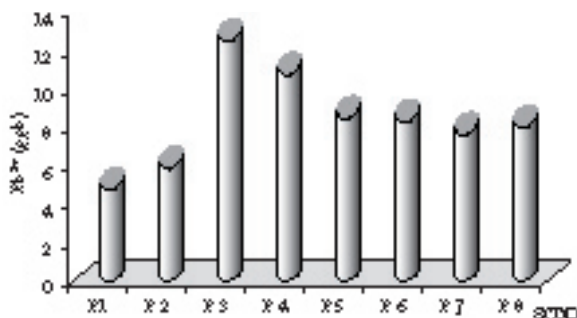
Sitio	Clave
Puente Almoloya	P1
Puente Mezapa	P2
Puente México-Toluca	P3
Puente Totoltepec	P4
Puente Toluca-Naucalpan	P5
Puente V. Cuauhtémoc	P6
Puente Temoaya	P7
Alzate (Zona B )	P8

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICA 2  
VARIACIÓN DEL CROMO EN EL AGUA DE VARIOS SITIOS  
DEL RÍO LERMA EN EL ESTADO DE MÉXICO



GRÁFICA 3  
VARIACIÓN DEL PLOMO EN EL AGUA DE VARIOS SITIOS  
DEL RÍO LERMA EN EL ESTADO DE MÉXICO



Fuente:Elaboración propia.

El estudiar la forma en que se transportan los contaminantes en esta cuenca (López *et al.*, 2004; López *et al.*, 2006), permite determinar los focos de contaminación desde su nacimiento hasta su entrada a la presa José Antonio Alzate (J.A. Alzate), así como identificar las zonas de aporte industrial, para establecer dónde se debería instalar previamente algún sistema (o sistemas) de tratamiento específico para estos aportes antes de su llegada a la presa; lo mismo se podría decir del agua municipal y de la agrícola. Esto ayudaría a mejorar el agua de entrada a la presa y así sería más sencillo el tratamiento del agua de ésta. Los contaminantes metálicos parecen mantenerse en las mismas formas químicas, dependiendo de las condiciones redox y ácido-base del agua (principalmente bicarbonatos y sulfuros ácidos).

El principal mecanismo de asociación de los metales con los sólidos presentes (material suspendido y sedimentado) parece ser la adsorción. La caracterización del agua del río Lerma y de la presa J.A. Alzate hizo resaltar la importancia de dos parámetros: el oxígeno disuelto y la transparencia. Las concentraciones del primero se acercan siempre al límite de detección de los equipos (0.01 mg/L) en el río y aumentan arriba de 1 mg/L en la segunda mitad de la presa.

Esta situación indica la presencia de una importante actividad microbiana de degradación de materia orgánica que consume el oxígeno y no permite la instalación de condiciones propicias a la vida acuática macroscópica. La transparencia del agua del río Lerma, en general de dos a cuatro centímetros, aumenta este fenómeno, ya que las materias en suspensión no dejan penetrar la luz en el agua y las escasas algas no tienen la actividad fotosintética para reponer el oxígeno consumido por las bacterias biodegradadoras. Por otro lado, diversos experimentos han demostrado que con varios meses estancada el agua del río Lerma, puede sostener vida macroscópica (insectos y moluscos). Estas observaciones demuestran que el material que se debe eliminar prioritariamente es el orgánico biodegradable y la materia en suspensión. Para lograrlo, un sistema de lagunas facultativas parece lo más factible, por su bajo precio y su sencillez de mantenimiento (Solís, 1994; Yáñez, 2003).

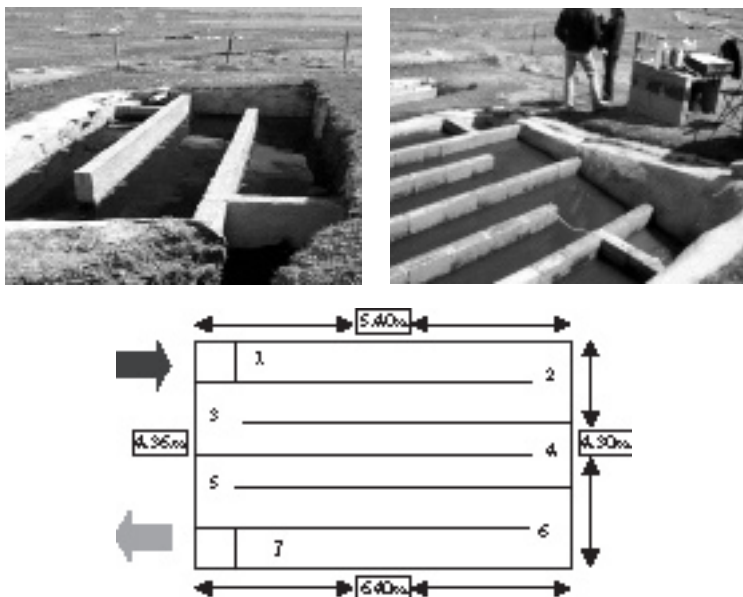
### *Ensayo de un sistema lagunar*

La segunda línea de este proyecto considera el papel que desempeña la presa J.A. Alzate al comportarse como una laguna de oxidación y estabilización, y se concentra en las posibilidades de ayudarla para que sea más eficiente la autodepuración (Rosas *et al.*, 2004). Esto se puede realizar mediante la instalación previa de un sistema de tratamiento específico para estos aportes contaminantes antes de su llegada a la presa. Primero es necesario el estudio de factibilidad del proceso; así se propone como un inicio el probar, diseñar y optimizar los parámetros de diseño mediante un modelo de sistema lagunar a escala reducida (figura 1).

Este sistema consta de varios módulos movibles con el fin de determinar el número óptimo de estanques facultativos y de maduración (estabilidad), con el objeto de emplearlos posteriormente para el diseño de una planta a escala real. En cada estanque, se determina la capacidad de remoción de la materia orgánica biodegradable por medio de la DBO<sub>5</sub>, el carbono orgánico disuelto y los derivados nitrogenados (NH<sub>3</sub>).



FIGURA 1  
PRIMERO Y SEGUNDO CONJUNTO DE SISTEMAS LAGUNARES.  
ESQUEMA DE MAMPARAS



Fuente: Elaboración propia.

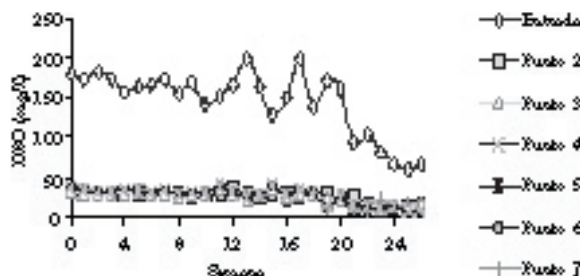
Los resultados derivados del prototipo para la propuesta de un escalamiento a mayor dimensión se podrán utilizar para establecer el o los lugares donde se requerirá, apoyado por los estudios topográficos. Esta planta piloto permite estudiar la factibilidad del tratamiento de volúmenes mayores del agua del río Lerma al nivel de la sección de la presa J.A. Alzate, que parece la más conveniente, mediante un sistema lagunar y plantas hidrófitas que podrán mejorar al ecosistema actual y su estética.

Para la construcción del sistema prototipo se establecieron las siguientes especificaciones: se construyó primero un sistema (figura 1, fotografía a la izquierda) con tres canales: en una orilla de una sección de la presa y al río, este sistema no fue suficiente.

Posteriormente se construyó otro sistema a un costado un poco más arriba para evitar que se inundara con la crecida de la presa, como se observa en la figura (foto de la derecha), se presenta el croquis, con dimensiones de un metro de altura con un flujo de  $0.576 \text{ m}^3/\text{d}$ . Se consideraron seis canales en serie, monitoreándose siete puntos, considerando la salida de cada uno como la entrada del siguiente (Rosas *et al.*, 2006). Las determinaciones de la  $\text{DBO}_5$  disuelta (gráfica 4), se realizaron con un equipo marca Velp y se seleccionó un intervalo de medición de 250 ppm de  $\text{DBO}_5$ . La remoción de la  $\text{DBO}_5$  total fue de 52% y la remoción  $\text{DBO}_5$  soluble fue de 82 por ciento.

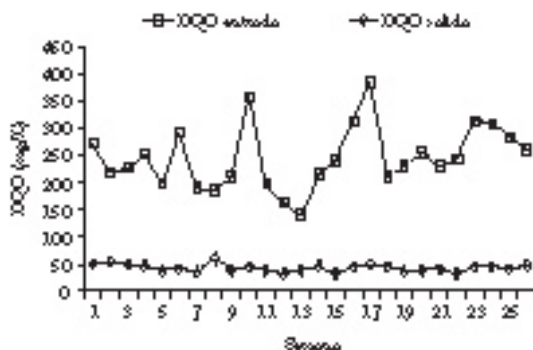
En el sistema lagunar experimental, la demanda química de oxígeno (DQO) varió en la entrada desde 175 mg/L hasta 400 mg/L y en la salida 25 mg/L hasta 82 mg/L (gráfica 5). En el caso de los análisis realizados al agua del río Lerma durante el periodo de estudio, la relación  $\text{DBO}/\text{DQO}$  promedio fue de 0,69 con un máximo de 0,84 y un mínimo de 0,42, lo que confirma la tratabilidad biológica presentada. Con referencia a la relación  $\text{DBO}/\text{DQO}$  del agua tratada, el valor presentado en el producto del sistema lagunar piloto fue de 0,62 en promedio con un máximo de 0,86 y un mínimo de 0,38 ligeramente arriba de lo reportado en sistemas de tratamiento mecánicos.

GRÁFICA 4  
COMPORTAMIENTO DE LA  $\text{DBO}_5$  EN EL SISTEMA LAGUNAR DE SEIS CANALES



Fuente: Elaboración propia.

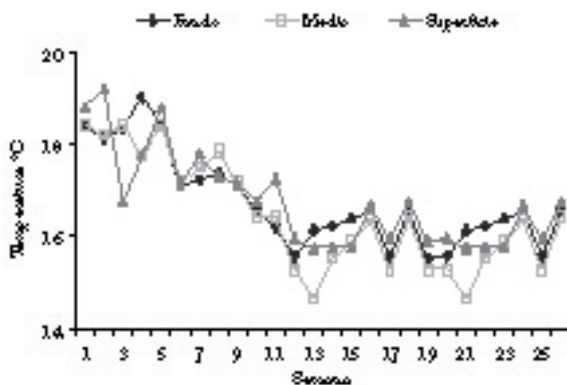
GRÁFICA 5  
COMPORTAMIENTO DE LA DQO EN LA ENTRADA  
Y EN LA SALIDA DEL SISTEMA LAGUNAR



Fuente: Elaboración propia.

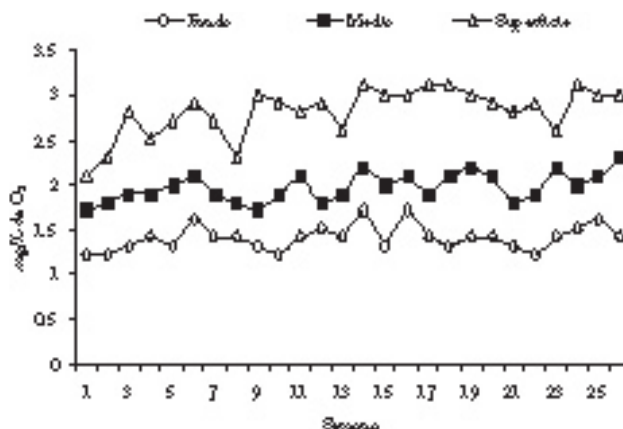
La temperatura y el oxígeno disuelto (OD), se determinaron simultáneamente, para lo cual se utilizó un sistema de medición de temperatura integrado al analizador de oxígeno disuelto modelo YSI 58.

GRÁFICA 6  
COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICA 7  
COMPORTAMIENTO DEL OXÍGENO



Fuente: Elaboración propia.

Las determinaciones de OD y temperatura siempre se monitorearon a tres niveles de profundidad (fondo, medio y superficie) y en los siete puntos geométricos de la laguna.

La temperatura siempre osciló entre los 15°C y los 19°C. Como el calor específico del agua es mucho mayor que el del aire, la temperatura del sistema lagunar permanece relativamente estable (gráfica 6). Este comportamiento asegura una estabilización de la temperatura en un intervalo adecuado para el desarrollo del ecosistema acuático, además de que indica el intervalo de temperatura en el que se debe calcular cualquier propuesta de tratamiento en el río Lerma.

### *Propuesta de fitorremediación*

La última línea pretende ensayar un tratamiento por fitorremediación de los suelos que rodean la presa, que se han contaminado por la adición constante de sedimentos de la misma, y donde los agricultores aprovechan la riqueza de la materia orgánica sin

haber considerado la presencia de contaminantes en los sedimentos. Para esta línea se han realizado estudios de movilidad química de metales potencialmente tóxicos, de sorción, de degradación (diagénesis), de estabilidad, entre otros, para garantizar que realmente se puedan emplear en la agricultura.

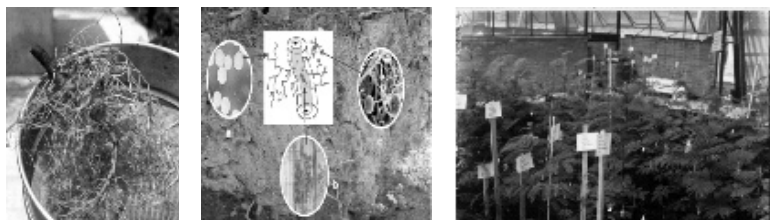
En estudios de suelos y sedimentos de la región circundante a la presa J.A. Alzate, se ha observado que la movilidad de los diferentes iones está íntimamente relacionada con la capacidad de adsorción, es decir, que los que se adsorben con mayor proporción son menos móviles y que el orden ascendente de movilidad es:  $\text{Cu} < \text{Pb} < \text{Cr} < \text{Zn} < \text{Cd}$ , que son los que al momento se han estudiado.

Una característica del proceso de asociación metal-sedimento es su complejidad, pues además de la adsorción participan la quelación y los intercambios iónicos y protónicos, cuyas cinéticas son más lentas que la de la adsorción física. Por ejemplo, el cadmio puede provenir de la industria de pinturas o del tratamiento del Zn; a su vez, el Cr proviene principalmente de los procesos de cromado de alguna industria de la zona; en cuanto al Cu, es ampliamente utilizado como  $\text{CuSO}_4$  en agricultura para evitar el crecimiento de hongos patógenos en el suelo, además del que proviene de la zona industrial. También se emplea agua residual para fines de riego agrícola en el Estado de México, que es la principal fuente de metales pesados, originando la acumulación de éstos en el suelo y llevando a una condición de riesgo para la salud de las poblaciones. El cobre, por efecto de solubilidad, presenta una movilidad mayor que el cromo.

Se está utilizando como planta fitorremediadora la *Leucaena leucocephala* (Gardezi *et al.*, 2004; Gardezi *et al.*, 2006a; Gardezi *et al.*, 2006b), ya que es una especie que desempeña un papel muy importante para el control de la erosión y rehabilitación de suelos degradados, suelos marginales, como los de la región sujeta a estudio. Esta planta presenta nódulos efectivos (figura 2) para fijar biológicamente nitrógeno, es decir, sirve de huésped adecuado al hongo micorrízico arbuscular que se asocia eficientemente con leguminosas arbóreas.

FIGURA 2

*LEUCAENA LEUCOCEPHALA* PRESENTA NÓDULOS  
PARA SER HUÉSPED DEL HONGO MICORRÍZICO



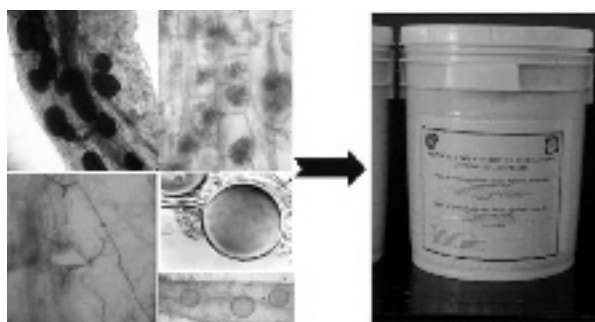
Fuente: Elaboración propia.

El hongo micorrízico arbuscular (figura 3), según Bothe *et al.* (1996), resiste y puede adaptarse a las condiciones edáficas prevalientes en suelos contaminados. La idea en el proyecto es probar la eficiencia del micorrízico arbuscular para permitir que la *Leucaena leucocephala* bioacumule metales y enriquezca el suelo, eliminar hasta cierto porcentaje los contaminantes del suelo, además del control biológico contra patógenos del suelo, dando mayor vigor y lozanía a las gramíneas (maíz principalmente) de la región.

Se procedió a obtener la concentración de cobre y cadmio en las hojas y el tallo de la planta en función de su crecimiento y

FIGURA 3

HONGOS MICORRÍZICOS



Componentes del inoculante

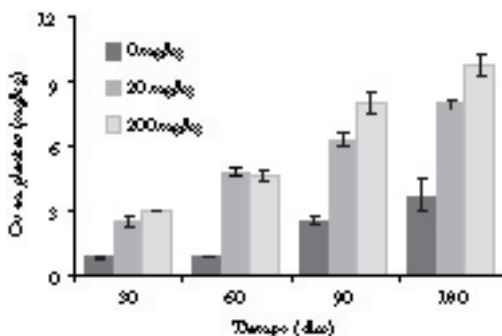
Inoculante

Fuente: Elaboración propia.

conteniendo *Rhizobium* y micorriza tipo *Glomus sp* ZAC-19. Se efectuaron estudios con 20 y 200 mg/kg de concentración de Cu y Cr en suelo. A las plantas que crecieron en suelo con 20 mg/kg y 200 mg/kg se les midió la concentración de Cu y Cr en materia seca. Se observó en ambos casos que la acumulación mayor en cada tiempo fue en el tallo (gráficas 8 y 9).

GRÁFICA 8

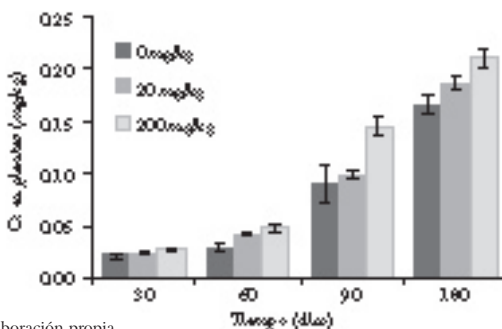
ACUMULACIÓN DE Cu EN PLANTA (CONSIDERANDO HOJAS Y TALLO) DE LA *LEUCAENA LEUCOCEPHALA* EN SIMBIOSIS CON *GLOMUS sp* ZAC-19- RHIZOBIUM



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICA 9

ACUMULACIÓN DE Cr EN PLANTA (CONSIDERANDO HOJAS Y TALLO) DE LA *LEUCAENA LEUCOCEPHALA* EN SIMBIOSIS CON *GLOMUS sp* ZAC-19-RHIZOBIUM



Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

El río Lerma dejó de existir como tal desde la década de 1940, cuando se empezó el envío de  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  del acuífero del Alto Lerma a la Ciudad de México y se inició la descarga de agua residual sin tratar el lecho del río. Los resultados analíticos demostraron que el agua del río Lerma, la cual presenta características totalmente sépticas y por lo tanto es carente de biota aerobia, puede desarrollar un ecosistema aerobio en 14 días y mantenerse éste por tiempo indefinido bajo las condiciones hidráulicas apropiadas. La responsabilidad de la calidad del agua vertida en el lecho del río Lerma es de la comunidad en general y no solamente de la industria, ya que no hay un sistema de tratamiento efectivo en el Valle de Toluca que trate alguna de las descargas municipales de esa zona. Respecto al oxígeno disuelto, los mejores sitios en los estudios son Almoloya del Río y los ríos Tejalpa y Temoaya, ya que prácticamente todo el río Lerma carece de oxigenación —ésta aumenta ligeramente cuando tiene la influencia de los ríos Tejalpa y Temoaya, principalmente este último, pero se deteriora en la presa J.A. Alzate. Es importante mencionar que, después del periodo de lluvias, mejora la oxigenación del río Lerma, pero se agrava en el estiaje. El río Lerma presenta la mayor carga orgánica e influye fuertemente en la presa J.A. Alzate, que se comporta como un sedimentador. Además de aportes municipales, el Lerma, principalmente el río Tejalpa y algo el Temoaya, arrastra material aluviónico, lo que aumenta la alta carga orgánica. En cuanto a los iones determinados, es el río Lerma el que influye en cuanto al aporte de todos los cationes y aniones, incluidos los de naturaleza potencialmente tóxica, como el Cd y el Pb principalmente. El Tejalpa y el Temoaya son los ríos más saludables e incorporan principalmente al ion calcio y a los aniones.

La comparación económica y operativa preliminar entre las diferentes tecnologías de tratamiento para aguas residuales existentes permite seleccionar los sistemas lagunares como una de las opciones más económicas, principalmente en las zonas rurales. La construcción y operación de un sistema lagunar experimental



en el sitio de interés demuestra la posibilidad de poder construir y operar un sistema lagunar a escala real en el mismo sitio, ya que las características del agua, incluidos los cambios de calidad, las condiciones de trabajo y meteorológicas, son reales, lo cual disminuye la incertidumbre en el diseño. Con las condiciones climáticas, hidráulicas, biológicas, físicas y químicas del experimento realizado con los sistemas lagunares, se concluye que en siete días y 10 horas la materia orgánica puede ser removida del agua e incorporada al ecosistema aerobio en forma de biomasa (bacterias, algas ostrácodos, crustáceos, insectos, etcétera).

En cuanto a la *Leucaena leucocephala*, se puede indicar que es una planta con múltiples ventajas pues, además de lo mencionado, también puede usarse como fertilizante orgánico, por su alto contenido de N, P, y K (550, 225 y 550 kg/ha/año respectivamente), para mejorar el paisaje. En cuanto al estudio, se observó que las concentraciones mayores de Cu y Cr se encontraron más en tallos y muy poco en hojas, lo que indica que las hojas se pueden utilizar como forraje, aunque bajo control. Por otro lado, el tipo de raíz permite utilizarla para terrazas que, en zonas con pendientes, evitan la pérdida de suelo y arrastres de éste en época de lluvia. Las dosis bajas de cobre y cromo estimularon el crecimiento de la planta *Leucaena leucocephala*, pero las dosis altas causaron un efecto tóxico. En la parte aérea, las hojas acumularon menor contenido de cobre y cadmio que los tallos, lo cual disminuye en ambos órganos, especialmente en presencia de hongos micorrízicos y *Rhizobium*. Esto puede ayudar a diseñar estrategias con fines de biorremediación, por lo que se sugiere la doble inoculación con *Rhizobium* y *Glomus spp. Zac.* en *Leucaena leucocephala* como parte del manejo de suelos agrícolas. El cobre, a pesar de ser un buen nutriente necesario para las plantas, en concentraciones elevadas afecta el desarrollo de la planta, ya que en dosis superiores a 200 mg kg<sup>-1</sup> es tóxica para la *Leucaena leucocephala*, y puede afectar los cultivos, principalmente de maíz, que es la producción fuerte de la zona. El cromo también, en la dosis alta de 200 mg kg<sup>-1</sup>, afectó la salud de la planta, aunque fue fitoextraída en una menor proporción que el Cu. El papel más importante de la *Leu-*

*caena leucocephala* es el biorrestaurador, donde el hongo micorrízico *Glomus sp. Zac-19*, en simbiosis con *Rhizobium*, es una magnífica opción, ya que permite también enriquecer el suelo con nitrógeno y fósforo de manera natural, sin requerir grandes cantidades de fertilizantes, y evita que con las lluvias sean arrastrados al río Lerma y otros afluentes de la zona, así como a la presa José Antonio Alzate, que actualmente se está eutrofizando.

Además, hay una ventaja cuando se trabaja con vegetales que después de un tiempo se cortan y se incineran o se deja que se transformen en abono vegetal para reciclar metales. Este procedimiento se puede repetir el número de veces que sea necesario para reducir la concentración de contaminantes del suelo a límites aceptables. Si se incineran las plantas, los residuos deben colocarse en un confinamiento controlado, pero la cantidad de ceniza será sólo alrededor de 10% del volumen de los residuos que habría que eliminar si se excavara el suelo contaminado para tratarlo, lo cual representa una ventaja.

#### AGRADECIMIENTOS

ESTE proyecto está financiado por los fondos sectoriales Semarnat-Conacyt, clave 2002-C01-0504.

#### BIBLIOGRAFÍA

- ÁVILA, P.P. (2001), "Dinámica de metales pesados no esenciales en la interacción agua-sedimento-biota de la presa José Antonio Alzate", tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México.
- , M. Balcázar, O.G. Zarazúa, Q.I. Barceló y D.C. Díaz (1999), "Heavy metal concentrations in water and bottom sediments of a mexican reservoir", *The Science of the Total Environment*, vol. 234, núm. 1-3, pp. 185-196.
- BARCELÓ, I., H. Solís, C. González, P. Ávila, J. García y C. Díaz (1998a), "Evolución estacional de parámetros fisicoquímicos en la presa J.A. Alzate, México. Memorias", *XXVI Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental: gestión ambiental en el siglo XXI*, Lima, Perú, CD ROM.

- , P. Ávila, H. Solís, C. González y A.L. Bussy (1998b), “Repartición geoquímica de metales pesados en sedimento superficial de la presa J.A. Alzate en el Edo. de México, México. Memorias”, *xxvi Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental: gestión ambiental en el siglo XXI*, Lima, Perú, CD ROM.
- , H. Solís, C. González, A.L. Bussy, P. Ávila y J. García (1999), “Determinación experimental de las especies de Fe, Mn y Cu en el agua de la presa J.A. Alzate, Edo. de México”, *Sociedad Química de México*, vol. 43, núm. 2, pp. 43-49.
- , H. Solís, C. González, P. Ávila y J. García (2000), “Determination of cadmium and lead species in the water column of the J.A. Alzate reservoir, Mexico”, *Environ. Wat. Res.*, vol. 72, núm. 2, pp. 132-140.
- , A.L. Bussy y H. Solís (2005), *Metal interactions with water and sediment in freshwaters*, capítulo 10, Applications of analytical chemistry in environmental research, ISBN: 81-308-0057-8, Manuel Palomar (ed.), India, Editorial Research Signpost, pp. 161-188.
- BOTHE, H., U. Hilderbrandt, M. Kardorf, S. Sonnewald y B. Schmitz (1996), “Arbuscular mycorrhiza and heavy metal plants in Germany”, COST Action 8.21, *Arbuscular mycorrhizas* in sustainable soil-plant systems, Gianinazzi y H. Schuepp (eds.), EUROP, Luxemburgo, p. 87.
- GARDEZI, A.K., Q.I. Barceló, A.V. Cetina, B.A.L. Bussy y S.M. Borja (2004), “Studies of phytoremediation by *Leucaena leucocephala* in association with arbuscular endomycorrhiza and rhizobium in soil polluted by Cu”, 8<sup>th</sup> World Multi-Conference on *Systemics, Cybernetics and Informatics*, vol. xv, 33-40, Orlando, Florida, EU, del 18 al 21 de julio.
- , Q.I. Barceló, B.A.L. Bussy, C.H. Solís y A.V. Cetina (2006a), “Distribución de Cu en un suelo agrícola y su relación con una posible planta fitorremediadora. Memorias”, *xv Congreso Nacional de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (Femisca)*, se encuentra en CD ROM, Guadalajara, Jalisco, del 24 al 26 de mayo.
- , Q.I. Barceló, A.V. Cetina, B.A.L. Bussy, N.J. Pérez y S.M. Borja (2006b), “Absorción de cobre y características de *Leucaena leucocephala* asociada con *Glomus spp.* y *Rhizobium* en suelo contaminado del Río Lerma”, México, *Rev. TERRA Latinoamericana*, vol. 24, núm. 3, julio-septiembre.

- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (1994), "Las industrias del Estado de México por subsectores", reporte.
- LÓPEZ, G.E., Q.I. Barceló, B.A.L. Bussy y C.H. Solís (2004), "Determinación de los coeficientes de partición del Cu en afluentes y en la presa J.A. Alzate en el Estado de México, México", *XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)*, CD-ROM, San Juan, Puerto Rico, EU, del 22 al 27 de agosto.
- y P.P. Ávila (2006), "Determinación del coeficiente de partición del hierro y cromo en la presa José Antonio Alzate en el Estado de México, México. Memorias", *XV Congreso Nacional de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (FEMISCA)*, CD ROM, Guadalajara, Jalisco, del 24 al 26 de mayo.
- ROSAS, de A.S., Q.I. Barceló, B.A.L. Bussy, C.H. Solís, S.M. Borja y J. Vázquez (2004), "Comportamiento de la DBO y DQO en un sistema lagunar piloto para la rehabilitación de un cuerpo de agua contaminado", *XIV Congreso Nacional de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (FEMISCA)*, se encuentra en CD ROM, Mazatlán, Sinaloa, del 12 al 14 de mayo.
- Q.I. Barceló, B.A.L. Bussy, C.H. Solís, S.M. Borja y G.E. López (2006), "Estudio cinético comparativo de la degradación de la materia orgánica en un sistema lagunar prototipo", *XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)*, CD ROM, Punta del Este, Uruguay, del 26 al 29 de noviembre.
- SOLÍS, M.C. (1994), "Lagunas de estabilización. modificadas modelo UAEM", *Informe técnico*, Conacyt 316/89 459/90, CIATIC, 16-25.
- YÁNEZ, F. (2003), "Temperaturas en lagunas de estabilización", *Seminario regional sobre lagunas de estabilización*, CEPIS, OPS, ANEMAPA, Guayaquil.

# Índice

INTRODUCCIÓN. . . . .	5
-----------------------	---

## Primera parte

### *Demanda, usos y gestión del agua*

#### POLÍTICA HÍDRICA EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO Y RIESGOS PARA SUMINISTRAR AGUA AL USO DOMÉSTICO E INDUSTRIAL

<i>Jorge A. Morales Novelo y Lilia Rodríguez Tapia . . . . .</i>	21
Introducción . . . . .	21
Población y demanda de agua en la CVM y su área metropolitana . . . . .	24
Usos del agua en la CVM. . . . .	29
El reuso, fuente potencial de abastecimiento de agua en la CVM . . . . .	41
Consideraciones finales . . . . .	47
Bibliografía . . . . .	51

#### ORGANISMOS OPERADORES EN EL DISTRITO FEDERAL Y ESTADO DE MÉXICO: DISCREPANCIA EN LA INFORMACIÓN ECONÓMICA OFICIAL

<i>Julio Goicoechea Moreno . . . . .</i>	55
Introducción . . . . .	55
Estructura económica . . . . .	56
Ingreso neto. . . . .	64
Superávit de operación e ingreso neto: discrepancia . . .	67
Conclusiones . . . . .	68
Anexo A. Metodología. . . . .	69

Anexo B. Glosario de términos . . . . .	70
Bibliografía . . . . .	73
EL CONSUMO DE AGUA EN LA AGRICULTURA DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO	
<i>Graciela Carrillo González e Isabel Quintas Pereira</i> . . . . .	75
Introducción . . . . .	75
Distribución del agua de riego en el sector agrícola . . . . .	76
Eficiencia en los sistemas de riego y productividad del agua . . . . .	78
Los esquemas de gestión del agua . . . . .	82
Agua para la agricultura en la ZMVM. . . . .	86
Consideraciones finales . . . . .	90
Bibliografía . . . . .	92
Fuentes electrónicas. . . . .	92
EL SISTEMA DE CONCESIONES DEL AGUA EN MÉXICO Y LA PARTICIPACIÓN DE LOS GRANDES CONSORCIOS INTERNACIONALES	
<i>Delia Montero Contreras</i> . . . . .	93
Introducción . . . . .	93
La apertura económica y su impacto en el sector hidráulico . . . . .	95
Las empresas trasnacionales y sus concesiones en México	106
Conclusiones . . . . .	113
Bibliografía . . . . .	116
EL MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO, ¿ESCASEZ O UN MODELO DE GESTIÓN INADECUADO EN MÉXICO?	
<i>Graciela Carrillo González y Roberto Constantino Toto</i> . . . . .	119
Introducción . . . . .	119
Importancia y disponibilidad de agua . . . . .	120
El agua en México . . . . .	124
El modelo de gestión: de una visión de oferta a una visión de demanda. . . . .	127
Consideraciones finales . . . . .	133
Bibliografía . . . . .	134

## Segunda parte

### *Sustentabilidad y cultura del agua*

#### ¿CÓMO CONSTRUIR UNA CULTURA DEL AGUA? PROYECTO

##### DE MANEJO SUSTENTABLE

<i>Ernestina I. Zapiain García y Alfonso S. Álvarez Mosqueda</i>	139
Introducción . . . . .	139
Modelo para construir una cultura del agua con valores compartidos . . . . .	139
Etapas del cambio . . . . .	142
El uso racional del agua y la cultura . . . . .	145
Premisas básicas para el diseño de lineamientos de política del uso del agua . . . . .	146
Estrategias nacionales para alcanzar los objetivos fijados en el sector hidráulico . . . . .	147
Conclusiones . . . . .	149
Bibliografía . . . . .	151

#### SUSTENTABILIDAD Y NUEVA CULTURA DEL AGUA:

##### UNA APROXIMACIÓN METODOLÓGICA PARA EVALUAR EL CASO

##### DEL VALLE DE MÉXICO

<i>Grupo de Economía Ecológica de México</i> . . . . .	153
Introducción . . . . .	153
Modelo de gestión del agua: principios metodológicos desde la economía ecológica y la nueva cultura del agua . . . . .	155
El agua en el Valle de México como referente empírico	163
Propuesta del modelo de agua para la Ciudad de México	167
Conclusiones . . . . .	175
Bibliografía . . . . .	176

#### LA PLANEACIÓN COLABORATIVA EN LA GESTIÓN INTEGRAL

##### DE CUENCAS AMENAZADAS, EL CASO DE LA CUENCA DE LOS

##### RÍOS AMECAMECA Y LA COMPAÑÍA

<i>Pedro Moctezuma Barragán y Óscar Monroy Hermosillo</i> . . .	179
Introducción . . . . .	179
El contexto: una cuenca amenazada . . . . .	180
La Sierra Nevada: el “plato hondo” de captación de agua para el Valle de México. . . . .	181

Sus diversos actores . . . . .	183
Un nuevo paradigma universitario para la promoción del desarrollo regional . . . . .	185
La UAM y su participación en la planeación colaborativa en la Sierra Nevada . . . . .	186
Construcción de una visión común y creación de capacidades. . . . .	188
Conclusión . . . . .	192
Bibliografía . . . . .	193

## EL ENFOQUE DE ESTUDIOS INTEGRALES EN LA PLANEACIÓN

### DE LA CONSERVACIÓN DEL AGUA

<i>Marta M. Chávez Cortés y Juan M. Chávez Cortés</i> . . . . .	195
La necesidad de integrar la planeación del paisaje y el agua en el marco de la sustentabilidad . . . . .	195
Visiones/estrategias en la gestión del agua. ¿Cómo se han abordado? Fortalezas y debilidades . .	198
Estrategias integrales en el modelo suave: manejo integral de cuencas. ¿Qué implica? ¿Cómo se construye? El modelo transdisciplinario como alternativa . . . . .	204
Una experiencia en el contexto metropolitano: viabilidad del Canal Nacional en el Distrito Federal para poder ser planeado como un corredor verde . . .	211
Conclusiones generales . . . . .	223
Bibliografía . . . . .	226

## MÁS SIGLOS, MÁS TÚNELES... Y MÁS INUNDACIONES EN LA CIUDAD DE MÉXICO. HACIA EL CUARTO CENTENARIO DE LA

### EDIFICACIÓN DE TÚNELES EN LA CIUDAD

<i>Jorge Legorreta</i> . . . . .	231
Túnel de Huehuetoca o Tajo de Nochistongo . . . . .	232
Túnel de Tequixquiac y el Gran Canal del desagüe . . .	234
Nuevo Túnel de Tequixquiac . . . . .	235
Emisor central e interceptores del Drenaje Profundo . .	237
El emisor oriente . . . . .	239
En síntesis . . . . .	240
Bibliografía . . . . .	241



# Tercera parte

## *Innovación tecnológica en la UAM para la sustentabilidad hídrica*

### DETECCIÓN DE FUGAS NO VISIBLES EN REDES DE AGUA

<i>Eugenio Gómez-Reyes, Víctor H. Téllez-Arrieta y Rebeca Quiñonez-Piñón</i> . . . . .	245
Introducción . . . . .	245
Modelo numérico . . . . .	247
Monitoreo . . . . .	249
SIG . . . . .	250
SIARDA. . . . .	252
Casos de aplicación . . . . .	256
Conclusiones . . . . .	257
Bibliografía . . . . .	258

### ELECTROINCINERACIÓN DEL COLORANTE TEXTIL ÍNDIGO EN UN REACTOR ELECTROQUÍMICO PREPILOTO FM01-LC USANDO ELECTRODOS TRIDIMENSIONALES DE DIAMANTE DOPADOS CON BORO

<i>José Luis Nava, Edgar Butrón e Ignacio González</i> . . . . .	259
Resumen . . . . .	259
Introducción . . . . .	260
Desarrollo experimental . . . . .	261
Resultados y discusión . . . . .	264
Conclusiones . . . . .	268
Bibliografía . . . . .	268

### APLICACIÓN DE UN REACTOR CON ELECTRODO DE CILINDRO ROTATORIO (RCE) AL TRATAMIENTO DE UN ENJUAGUE DE COBRIZADO GENERADO POR UNA INDUSTRIA DE CROMADO DE PLÁSTICOS

<i>Fernando F. Rivera, Ignacio González y José L. Nava</i> . . . . .	271
Introducción . . . . .	271
Experimental . . . . .	273
Análisis de resultados y discusión . . . . .	276
Conclusiones . . . . .	281
Bibliografía . . . . .	281

LOS SEDIMENTOS EN EL RÍO LERMA: UNA POSIBLE FUENTE  
DE CONTAMINACIÓN METÁLICA

<i>Anne Laure Bussy, Icela Barceló, Hugo Solís, Edgar López, Pedro Ávila, Celia Olivera y Luis Mejía</i> . . . . .	283
Introducción . . . . .	283
Metodología . . . . .	290
Resultados y discusión. . . . .	294
Conclusiones . . . . .	302
Agradecimientos . . . . .	303
Bibliografía . . . . .	303

MOVILIDAD GEOHIDRODINÁMICA DE METALES PESADOS  
EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO LERMA, RÍOS TRIBUTARIOS  
Y LA PRESA JOSÉ ANTONIO ALZATE EN EL ESTADO DE MÉXICO

<i>Edgar López, Icela Barceló, Pedro Ávila, Anne Laure Bussy, Hugo Solís, Beatriz García y Celia Olivera</i> . . . . .	307
Introducción . . . . .	307
Método . . . . .	311
Resultados . . . . .	313
Conclusiones . . . . .	315
Agradecimientos . . . . .	315
Bibliografía . . . . .	315

ENTRAMPAMIENTO DE UN CONSORCIO MICROBIANO PARA  
BIORREMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS CON MTBE

<i>Diana Pimentel González, Sergio Revah, Rafael G. Campos Montiel, Óscar Monroy Hermosillo y Eduardo J. Vernon Carter</i> . . . . .	317
Resumen . . . . .	317
Introducción . . . . .	318
Materiales y métodos . . . . .	321
Resultados y discusión. . . . .	324
Conclusiones . . . . .	326
Agradecimientos . . . . .	327
Bibliografía . . . . .	327

## Cuarta parte

### *Manejo integral del agua*

#### MANEJO INTEGRAL DEL SISTEMA HÍDRICO DEL RÍO TLALMANALCO

<i>Erasmó Flores Valverde, Juan Manuel Pomares,</i> <i>María Rita Valladares Rodríguez y Agustín Breña Puyol . . .</i>	333
Introducción . . . . .	333
Antecedentes . . . . .	334
Metodología . . . . .	336
Selección de los puntos de muestreo . . . . .	337
Resultados . . . . .	338
Discusión de resultados . . . . .	342
Propuestas . . . . .	343
Conclusiones . . . . .	343
Bibliografía . . . . .	344

#### LA INFILTRACIÓN DEL AGUA EN LA CUENCA DE MÉXICO

<i>Erasmó Flores Valverde, Juan Manuel Pomares,</i> <i>María Rita Valladares Rodríguez y Agustín Breña Puyol . . .</i>	345
Introducción . . . . .	345
Propuestas . . . . .	348
Otro escenario . . . . .	349
Información a tomarse en cuenta . . . . .	352
Análisis de acciones realizadas . . . . .	354
Otra visión en las acciones a emprender . . . . .	355
Planeación . . . . .	358
Conclusión . . . . .	360
Bibliografía . . . . .	360

#### PLAN INTEGRAL DE SANEAMIENTO DEL RÍO CHICO

##### DE LOS REMEDIOS (NAUCALPAN)

<i>María Rita Valladares Rodríguez, Erasmó Flores Valverde</i> <i>y Felipe López Sánchez . . . . .</i>	361
Introducción . . . . .	361
Características de la zona de estudio . . . . .	363
Desarrollo . . . . .	365
Resultados . . . . .	369
Conclusiones . . . . .	375
Bibliografía . . . . .	377

## LA CUENCA ALTA DEL RÍO LERMA Y LA PRESA

## JOSÉ ANTONIO ALZATE: UN ESTUDIO INTEGRAL

<i>Icela D. Barceló Quintal, Abdul Khalil Gardezi, Sergio Rosas de Alva, Anne L. Bussy Beaurain, Hugo Solís Correa, Edgar López Galván, Pedro Ávila Pérez, Celia Olivera Martínez y Yara Ramírez Quirós. . . . .</i>	379
Introducción . . . . .	379
Perspectivas de solución . . . . .	381
Conclusiones . . . . .	392
Agradecimientos . . . . .	394
Bibliografía . . . . .	394

*Innovación tecnológica, cultura y gestión del agua. Nuevos retos del agua en el Valle de México*, se terminó de imprimir en la Ciudad de México durante el mes de mayo del año 2009.

La edición, en papel de 75 gramos, estuvo al cuidado de la oficina litotipográfica de la casa editora.



