

Reutilización de aguas residuales en México

El crecimiento de la población urbana ha sido un fenómeno acelerado en la región de América Latina y el Caribe en décadas recientes. La mayoría de las ciudades tienen tasas de crecimiento del 3 al 5% y para el año 2000 se espera que más de 30 ciudades excedan el millón de habitantes, y que muchos cientos de ciudades superen los 100.000. Este incremento en la población no ha ido acompañado de una mejora en la prestación de servicios de agua potable y alcantarillado, así por ejemplo la cobertura en alcantarillado está considerablemente atrasada con respecto al crecimiento de la población aunque las aguas residuales son generadas en grandes volúmenes por la mayoría de las ciudades. La construcción de los sistemas de alcantarillado en las ciudades de esta región se ha realizado de forma intermitente a lo largo de muchos años, habiéndose introducido los primeros sistemas en las capitales más antiguas a inicios del presente siglo como resultado de las preocupaciones de salud pública y de la novedad de la ingeniería europea.

Esta construcción en etapas ha propiciado que muchos sistemas no estén bien integrados y racionalizados. Además, no se ha realizado una selección de puntos de descarga, de modo que existe una gran variedad de lugares donde se evacúan las aguas residuales como son ríos, lagos, acuíferos, sobre el terreno, etc. Tampoco se ha llevado a cabo una previsión adecuada sobre que sistemas de tratamiento de aguas residuales se deben de utilizar. Con frecuencia, en la mayoría de ocasiones, se descarga el efluente directamente al río o al canal más próximo, solamente con un tratamiento prima-

rio.

Por otro lado, en las regiones áridas, durante la estación seca, estos cursos de aguas superficiales pasan a ser cursos de aguas residuales. Hay que tener en cuenta que, en estas mismas regiones, el uso de las aguas que circulan por estos cauces para riego agrícola está muy extendido. Asimismo, se ha prestado poca atención a la limitada capacidad de autodepuración de los cursos de agua y al hecho de que, en muchos casos, los puntos de descarga se han quedado dentro de áreas pobladas como resultado del crecimiento urbano.

Actualmente, gran parte de la reutilización del agua residual para riego en la región de América Latina y el Caribe se efectúa en aquellas zonas donde los cursos de aguas superficiales contienen una alta proporción de efluentes residuales. En las regiones más áridas, la presión para cubrir las necesidades de abastecimiento para riego es tan importante, que existen muchos casos de prácticas ilegales o indiscriminadas, tales como el riego con aguas residuales negras obtenidas directamente de los colectores y/o el cultivo de vegetales, verduras y frutas en campos regados con aguas residuales tratadas inadecuadamente.

Varios aspectos de las prácticas actuales de uso y disposición de aguas residuales implican un gran riesgo para la salud; un riesgo directo para los agricultores e indirecto para el público en general que consume los productos agrícolas regados con aguas residuales. Estas prácticas son responsables de muchas de las enfermedades endémicas asociadas con bacterias patógenas y otros microorganismos y están implicadas en la propagación rápida y la persistencia del brote actual del cólera en algunas partes de la región. El otro peligro a largo plazo es la posible concentración de elementos tóxicos en los suelos agrícolas; especialmente plomo, cadmio, mercurio y zinc; y posiblemente también boro y litio. Este es un peligro potencial serio, sobre todo cuando se encuentran presentes en las aguas residuales ciertos tipos de efluentes industriales de alta toxicidad.

Otro riesgo es la contaminación de los acuíferos. En términos generales, es de esperar un deterioro importante de la calidad de las aguas subterráneas, generalmente de forma lenta pero persistente. El grado de riesgo de contaminación variará con la escala y modo de generación de las aguas residuales, su calidad y las características hidrogeológicas del medio. Así, por ejemplo, bajo ciertas condiciones hidrogeológicas y altas tasas de lixiviación de aguas residuales se puede producir la contaminación de las aguas subterráneas con microorganismos patógenos, compuestos inorgánicos y algunas trazas de sustancias orgánicas. Normalmente, se pueden detectar importantes incrementos en la concentración de nitratos y en la salinidad de las

aguas subterráneas, así como la aparición de determinados compuestos orgánicos.

Un aspecto positivo del riego con aguas residuales es su contribución a la recarga del acuífero pero es necesario establecer cuales son los beneficios del incremento de la recarga del acuífero frente al riesgo de contaminación. Actualmente, en esta región de América Latina la recarga se hace pocas veces de forma planificada y se presenta como un resultado casual de las prácticas existentes de disposición o uso para riego agrícola.

Las aguas residuales en México

En México, durante las últimas décadas, el crecimiento poblacional y el desarrollo industrial han producido efectos que degradan el medio ambiente y deterioran sus recursos, como la contaminación del agua, que ha dado lugar a mayores riesgos en la salud y a un deterioro de la calidad de vida de la población (Cifuentes *et al.*, 1995). El gobierno federal, desde la década de los setenta, ha considerado que la gestión del agua es un tema prioritario y que la depuración de las aguas residuales debe ser empleada como una herramienta de gestión con el fin de controlar y prevenir la contaminación. De acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento, México contaba, en junio de 1997, con 808 sistemas de depuración de aguas residuales municipales. Del total de estos sistemas de tratamiento, 615 se encontraban en operación (76%) con un caudal de 35.34 m³/s. Con base en el caudal de operación y si se estima que se generaban 231 m³/s de aguas residuales en el país (SEMARNAP, 1995), sólo se están tratando el 15.3% de este caudal, por lo que se descargaba al ambiente alrededor de 196 m³/s de aguas residuales sin tratar.

Los sistemas de tratamiento con que cuenta el país tienen gran variedad de procesos, pero los más empleados son las lagunas de oxidación, que se utilizan en 416 plantas de tratamiento, y los lodos activados, que se emplean en 174 plantas. Entre estos dos procesos se tiene más del 70% de las plantas de tratamiento del país.

De los 615 sistemas de depuración de aguas residuales municipales en operación, sólo se cuenta con información de eficiencia de operación de 379 de éstos; 113 se encuentran en el rango de eficiencia de 0 a 50%, 133 en el rango de 50 a 75% y 133 en el rango de > 75%. Con base en esta información, más del 70% de las plantas, están por encima del 50% de eficiencia.

En México existen varios distritos de riego que operan bajo el sistema de riego con aguas residuales, por lo que es considerado como uno de los paí-

ses más experimentados en este tema. En la mayoría de los casos el uso de las aguas residuales no ocurre directamente después del tratamiento o disposición sino indirectamente desde los cursos de aguas superficiales, cuyos caudales durante la estación seca son en gran parte de aguas residuales. En el cuadro 14.1 se presentan algunos ejemplos de reutilización de aguas residuales en México. Como se puede comprobar, en la mayoría de los casos, se utilizan aguas negras que no han sido sometidas a ningún tratamiento de depuración convencional. Estas aguas se descargan en ríos donde se produce, por efecto de dilución y por autodepuración, cierta disminución de la carga contaminante.

El interés, por parte de las autoridades, de regular la reutilización de aguas residuales con objeto de paliar e impedir problemas sanitarios y medioambientales ha permitido establecer una serie de criterios. Mención específica requiere la reciente modificación al marco normativo en materia de descarga de aguas residuales (NOM 001-ECOL-1996), en la que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. No obstante lo anterior, y a pesar de los esfuerzos realizados, un alto porcentaje de las descargas que se efectúan en la actualidad son de aguas residuales municipales e industriales sin tratamiento, lo que implica que hay que invertir más para poder llevar a cabo un control de las descargas (Castillo *et al.*, 1997).

Cuadro 14.1
Algunos ejemplos de reutilización de
aguas residuales en México.

Localidad	Cultivos	Sistema de tratamiento
Valle del Mezquital (Hidalgo)	Cereales y alfalfa	Efluentes brutos
Valle de León (Guanajuato)	Sorgo, trigo, alfalfa	Efluentes brutos
Cuenca del Río de las Avenidas (Pachuca, Hidalgo)	Cereales	Efluentes brutos
Valle de Ixtlahuaca – Atlacomulco (México)	Forrajes	Secundario + efluentes brutos
Acuífero de Tecamachalco (Puebla)	Cereales	Efluentes brutos

En el cuadro 14.2, se exponen los criterios fundamentales de esta normativa en referencia a las descargas de aguas residuales en suelos, ríos y embalses naturales y artificiales para su posterior uso en riego agrícola. Los valores hacen referencia al promedio diario (P.D.) que es el valor que resulta del análisis de una muestra compuesta y al promedio mensual (P.M.), que representa el valor que se obtiene de calcular el promedio ponderado, en función del caudal, de los valores que resulten del análisis de al menos dos muestras compuestas (promedio diario).

En cuanto a los microorganismos, el límite máximo permisible de patógenos tomando como indicador los coliformes fecales es de 1000 y 2000 NMP/100mL para el promedio mensual y diario, respectivamente.

Cuadro 14.2

Límites máximos permisibles para contaminantes básicos en aguas residuales que se descargan en ríos, embalses y suelos, y que son utilizadas posteriormente como agua de riego (NOM 001 ECOL 1996)

Parámetros	Unidades	Ríos		Embalses		Suelo	
		P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura	° C	N.A.	N.A.	40	40	N.A.	N.A.
Grasas y aceites	mg/L	15	25	15	25	15	25
Materia Flotante	mg/L	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos sedimentables	mg/L	1	2	1	2	N.A.	N.A.
Sólidos suspendidos totales	mg/L	150	200	75	125	N.A.	N.A.
DBO ₅	mg/L	150	200	75	150	N.A.	N.A.
Nitrógeno total	mg/L	40	60	40	60	N.A.	N.A.
Fósforo total	mg/L	20	30	20	30	N.A.	N.A.
Arsénico	mg/L	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4
Cadmio	mg/L	0.2	0.4	0.2	0.4	0.05	0.1
Cianuro	mg/L	2.0	3.0	2.0	3.0	2.0	3.0
Cobre	mg/L	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0
Cromo	mg/L	1.0	1.5	1.0	1.5	0.5	1.0
Mercurio	mg/L	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01
Níquel	mg/L	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0
Plomo	mg/L	0.5	1.0	0.5	1.0	5.0	10
Zinc	mg/L	10	20	20	20	10	20

P.M.: promedio mensual, P.D.: promedio diario, N.A.: no es aplicable

La contaminación por parásitos se determina en base a los huevos de helmintos. El límite máximo permisible para las descargas en suelo para uso agrícola es de un huevo de helminto por litro para riego restringido (no se pueden regar legumbres y verduras que se consuman crudas) y de cinco huevos por litro para riego no restringido (se puede regar cultivos como forrajes, granos, frutas, legumbres y verduras).

Ejemplos de reutilización de aguas residuales para riego en México

El caso del Valle de León (Guanajuato)

El Valle de León se localiza en el sector occidental del Estado de Guanajuato, en el centro de México; abarcando parcialmente los municipios de León, San Francisco del Rincón y Purísima de Bustos (Figura 14.1). El área tiene un clima semiárido con una precipitación media de 600 mm/año. Las lluvias se presentan en verano con cierta irregularidad. La temperatura media

Figura 14.1.

Localización geográfica de los Estados de Guanajuato e Hidalgo



anual es de 18°C, con un valor máximo de 35°C en verano y mínimo de 3°C en invierno.

En el Valle de León existen 1340 pozos, que extraen un volumen 204 Hm³/año, provocando una sobreexplotación de 108 Hm³ anuales, ya que la recarga es de solamente 96 Hm³/año. En esta zona sólo existe una unidad hidrogeológica principal, constituida por rocas volcánicas, depositadas en un ambiente lacustre, intercaladas con sedimentos aluviales formados por gravas, arenas, arcillas y tobas, predominando el paquete de las tobas volcánicas. La transmisividad de los materiales que integran el acuífero es baja, sobre todo en las zonas cercanas a la ciudad, donde varía de 80 a 450 m²/día (Castañón *et al.*, 1995).

La ciudad de León posee una población de 1.100.000 habitantes y es uno de los centros más importantes de fabricación de calzado en América Latina. El abastecimiento urbano depende, en gran parte, del agua subterránea que se extrae de unos 80 pozos, distribuidos dentro de la mancha urbana y agrupados en seis campos al SW y S de la ciudad.

Problemática de las aguas residuales en el Valle de León

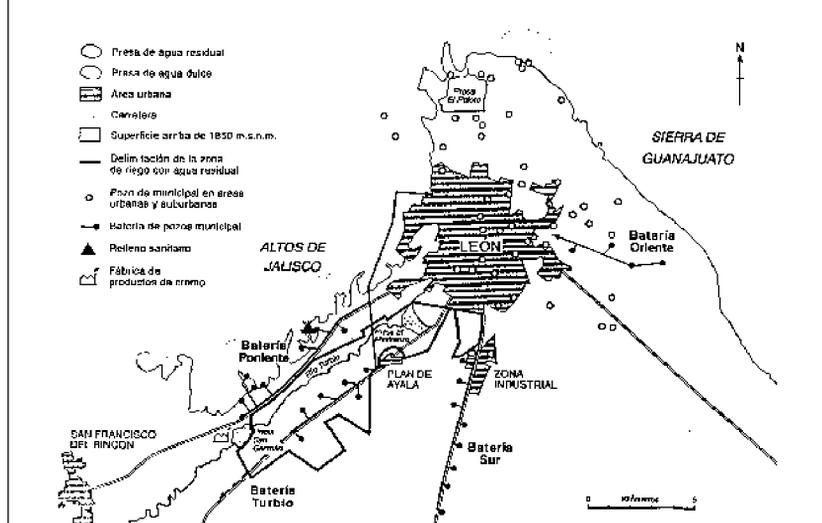
La ciudad cuenta con una amplia red de saneamiento (aunque no cubre toda la ciudad) y produce alrededor de 0.35 Hm³/día de aguas residuales, parte de los cuales se descargan sin tratamiento en el río Turbio, el cual está controlado por pequeños embalses. Este caudal incluye 0.08 Hm³/día de aguas residuales industriales procedentes, principalmente, de las fabricas de cuero, la mayoría de las cuales están dispersas dentro la ciudad. La presencia de estas fabricas se refleja en las características químicas de las aguas residuales con altos contenidos en cromo y cloruros.

Las aguas residuales se utilizan desde hace más de 30 años para riego en un área cercana a la ciudad de León, comprendida entre la presa El Mastanzo y la población de Plan de Ayala. La zona de influencia de riego con aguas residuales se ha ido desplazado hacia el sur, conforme el área urbana se ha extendido hacia otras dos áreas; un área comprendida entre la población de Plan de Ayala y Puerta de San Germán, que es regada desde hace 20 años y otra área en la zona conocida como El Monte, que fue puesta en regadío hace 10 años (Figura 14.2).

La rotación de cultivos en la zona es de sorgo en el ciclo primavera-verano y trigo en el ciclo otoño-invierno; en algunos terrenos se siembra alfalfa, la cual queda como un cultivo perenne por siete años en promedio. En esta zona no se cultivan hortalizas. Hacia el oriente del valle, donde se riega con agua subterránea, los cultivos principales son la patata, col y cebolla, que se alternan con sorgo o trigo según la temporada.

Figura 14.2

Mapa de localización de las áreas regadas con aguas residuales y de los pozos de agua



Efecto del riego con aguas residuales

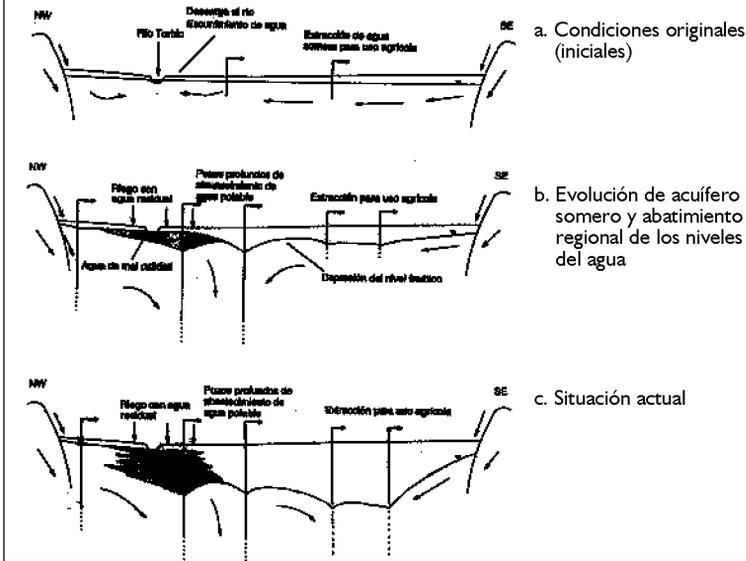
Recarga del acuífero

Como resultado del rápido crecimiento de la ciudad el uso del agua subterránea se ha incrementado de tal forma que el caudal extraído del acuífero es aproximadamente el doble de la recarga media anual. El estudio de la evolución de la piezometría en el valle permite comprobar que en el área de mayor explotación, al sur de la ciudad, el nivel piezométrico ha descendido a un ritmo de 1 a 5 m/año (Chilton *et al.*, 1996) y el descenso total en el centro de esta área es del orden de los 90 m, para el período comprendido entre 1959 y 1995.

En contraste, dentro del área regada con aguas residuales, al SW de León, ha surgido un acuífero somero colgado, con un nivel piezométrico que se encuentra a una profundidad comprendida entre los 5 y 10 metros (Figura 14.3). Se ha comprobado que este nivel permanece bastante estable en el tiempo y que la infiltración de las aguas residuales es una fuente importante de recarga para este acuífero (Figura 14.3).

Figura 14.3

Comportamiento hidrogeológico en el tiempo de la zona regada con aguas residuales en el Valle de León (Chilton *et al.*, 1996)



Impacto en la calidad de las aguas subterráneas

Los niveles de fondo de los principales parámetros físico-químicos a nivel regional son bajos, lo cual permite distinguir fácilmente entre el agua subterránea afectada por infiltración de aguas residuales y el agua no contaminada (Figura 14.4), ya que el agua contaminada presenta elevadas concentraciones de la mayoría de los iones mayoritarios (Ca^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^-) y bajo contenido en oxígeno disuelto.

La interpretación y modelación de las secciones transversales del acuífero mediante sondeos electromagnéticos transitorios (EMT) en la zona de riego con aguas residuales sugieren que la profundidad de penetración del agua de baja calidad alcanza por lo menos los 40 metros, con una salinidad lo suficientemente alta como para proporcionar un contraste marcado de conductividades, con una amplia zona de transición por debajo de ésta. La zona más profunda y la mayoría de las zonas someras con agua de baja calidad se localizan en las áreas más antiguas de riego con aguas residuales, mientras que por debajo de las áreas de riego más reciente, sólo se observa

Figura 14.4

Representación en el diagrama de Piper de la composición química del agua subterránea en el Valle de León (Chilton *et al.*, 1996)

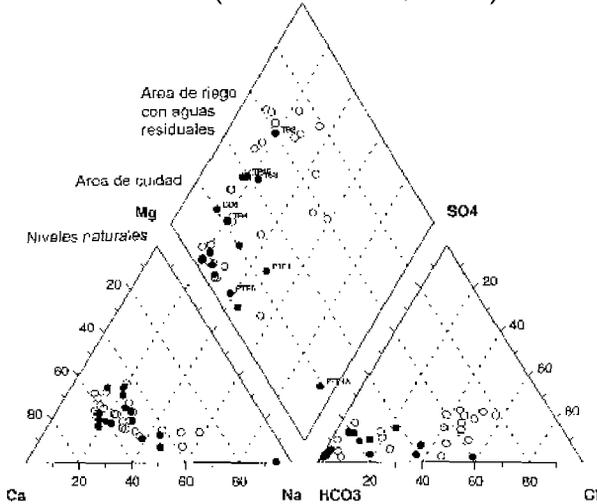
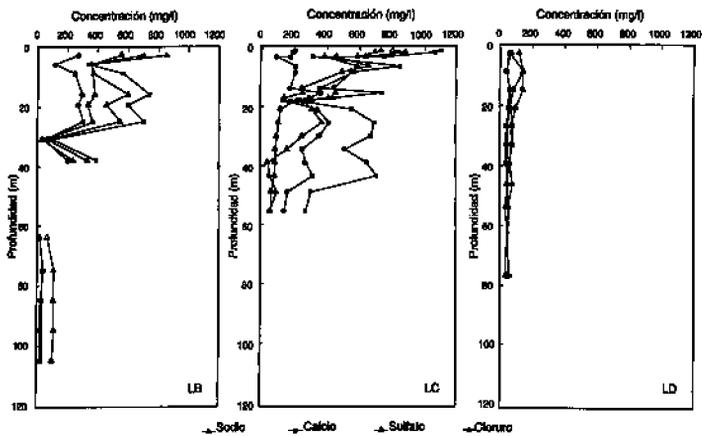


Figura 14.5

Concentración de sodio, calcio, sulfato y cloruro en áreas regadas con agua subterránea



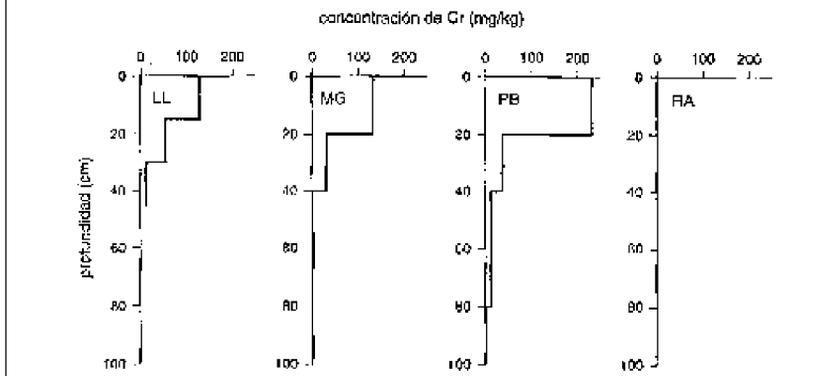
ron pequeños contrastes de conductividad, los cuales son menos constantes.

En los perfiles verticales de calidad del agua subterránea realizados en varios pozos ubicados en el área de riego con aguas residuales se pudo comprobar como las concentraciones de cloro en la parte superior de los pozos oscilaban entre los 800 y 1000 mg/L, en contraste con los valores inferiores a 100 mg/l que se detectan en áreas regadas con agua subterránea (Figura 14.5). A partir de estos perfiles, también se constató que la materia orgánica presente en el agua infiltrada se oxida, transformándose en bicarbonato, y que el nitrógeno orgánico se oxida a nitrato. El sodio es intercambiado por el calcio y ciertas cantidades de sulfato de calcio precipitan. Estos procesos se producen en los primeros 40 metros del acuífero (Chilton *et al.*, 1996).

El agua residual contiene concentraciones significativas de metales pesados y, por lo tanto, el agua subterránea en el área de riego presenta concentraciones más elevadas de metales pesados que en el resto del valle. Sin embargo, la concentración de cromo en el agua subterránea es baja, a pesar de las grandes cantidades presentes en el agua residual, lo cual es debido a que el cromo se ha acumulado en el terreno, al igual que otros metales pesados. En el perfil del suelo la concentración de cromo decrece rápidamente con la profundidad; encontrándose poco cromo por debajo de los 0.3 m de pro-

Figura 14.6

Concentración de cromo en suelo a distintas profundidades en tres puntos de muestreo localizados en el área regada con aguas residuales (LL, MG, PB) y en otro punto ubicado fuera del área de riego (RA) (Chilton *et al.*, 1996).



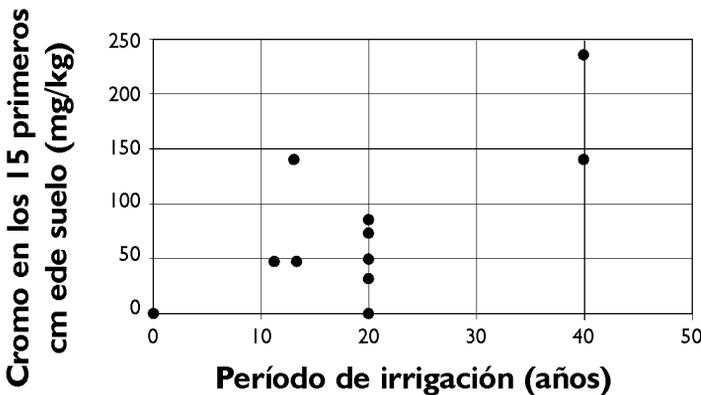
fundidad (figura 14.6). También se ha constatado que las concentraciones de cromo en el suelo presentan un alto grado de correlación con el período de tiempo de riego en cada área, tal y como se puede apreciar en la figura 14.7.

También se ha constatado que el agua residual contiene altas concentraciones de bacterias coliformes, las cuales se han detectado frecuentemente en el agua del acuífero somero. La penetración profunda de estas bacterias a través de la gruesa secuencia de estratos lacustres y volcánicos parece poco probable.

Reutilización de las aguas residuales de la ciudad de México

El Valle de México se encuentra localizado a más de 2240 m.s.n.m. en una cuenca endorreica por lo cual se tuvieron que construir salidas artificiales para el drenaje. Este sistema es de gran complejidad y conduce tanto las aguas residuales como las pluviales a través de una red primaria de 1212 Km de longitud y una red secundaria de 12326 Km, un río superficial (de Los Remedios), cuatro ríos entubados (Viaducto Piedad, Consulado, Churubusco y San Joaquín), varios colectores semiprofundos, 30 presas, 10 lagu-

Figura 14.7
Correlación entre contenido en cromo en suelo y período de riego (Chilton *et al.*, 1996).



Cuadro 14.3

Concentraciones (valores medios) para el agua residual del Emisor Central y el Gran Canal en épocas de estiaje y lluvias durante 1997 (Jiménez y Chávez, 1998).

Parámetros	Unidades	Emisor profundo		Gran canal	
		Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias
DBO	mg/L	341	427	240	180
DQO	mg/L	578	475	480	440
SDT	mg/L	912	707	900	1550
SST	mg/L	295	264	135	185
Huevos helminto	HH/L	14	27	-	-
PH		7.3	-	7.5	7.9
N-NH ₄	mg/L	23	17	24	21
P-PO ₄	mg/L	6	5	26	25
SSAM	mg/L			13	13
Grasas y aceites	mg/L			40	40

nas y 93 Km de drenaje profundo (hasta 200 metros de profundidad y con diámetros de hasta 6 metros).

En la Ciudad de México y área metropolitana se generan alrededor de 4.8 m³/s de aguas residuales. Del total de agua residual generada se utilizan 4.8 m³/s para reuso urbano (llenado de lagos recreativos, riego de áreas verdes y lavado de automóviles), 3.2 m³/s se emplea en diversos fines en el ex-lago Texcoco, 38 m³/s se emplean sin tratamiento para el riego del Valle de Mezquital en Tula, Chiconautla y Zumpango (90.000 Ha de cultivos de alfalfa, maíz, trigo y algunas hortalizas) y, por último, 1.6 m³/s escurren a la Presa Enhd para ser usados aguas abajo, para riego. Los valores anteriores son promedios anuales y suelen aumentar en años lluviosos.

Principales características del agua residual

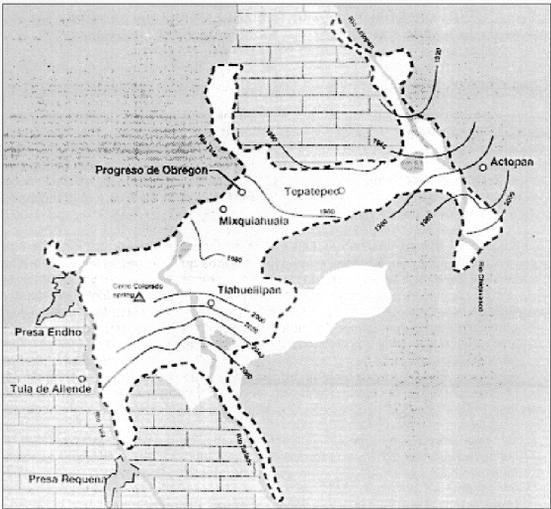
Para tratar los 4.8 m³/s que se reutilizan dentro del Valle de México, se cuenta con 18 plantas de tratamiento; 16 en la Ciudad de México y dos en el área metropolitana. Cabe mencionar que por el drenaje también se conducen, en promedio anual, otros 12 m³/s de agua de lluvia, que se concentra entre los meses de mayo y octubre. En términos de descarga, esto se refleja en una alta variabilidad de cantidad, pero no en calidad, ya que las características físico-químicas del agua son bastante similares en época de lluvias y estiaje, como se puede ver en el cuadro 14.3, donde se presentan los

resultados obtenidos en los análisis de las aguas residuales que circulan por el Emisor Central y el Gran Canal, que son dos de los principales colectores del sistema de drenaje. A grandes rasgos, se puede señalar que el agua residual de la Ciudad de México se caracteriza por tener un contenido de sólidos en suspensión totales (SST) de 336 mg/L, con una variación entre 116 y 3368 mg/L, un contenido en huevos de helmintos de 38.5 HH/L, fluctuando entre 10 y 60 HH/L y una variación en el contenido de coliformes fecales de $4.9 \cdot 10^8$ a $1.3 \cdot 10^9$ NMP/100mL (Jiménez y Chávez, 1998).

Reutilización de las aguas residuales en el Valle del Mezquital

Uno de los destinos del agua residual de la Ciudad de México es el Valle del Mezquital, al norte del Valle de México, en el Estado de Hidalgo (Figura 14.1), el cual es el ejemplo mundial más importante de “uso controlado” de riego con aguas residuales a gran escala. Comprende 90.000 Ha de riego agrícola y en él habitan 550.000 personas en 250 comunidades. Este valle recibe más de 3.5 Hm³/día de aguas residuales por un sistema de canales y túneles, cuyos principales colectores son el Emisor Central y el Gran Canal, los cuales presentan caudales muy variables dependiendo de la operación del sistema de alcantarillado y de drenaje de la Ciudad de México, pero pro-

Figura 14.8.
Localización del
área regada con
aguas residuales
en el Valle del
Mezquital



— isopieza freática en 1991
- - - área irrigada

median entre 600 - 700 Hm³/año y 400 - 500 Hm³/año, respectivamente.

El área es una depresión alargada y estructuralmente compleja, que está localizada a una altura de 1900-2000 m.s.n.m. y es drenada por el río Tula y dos de sus tributarios (Salado y Actopan). Los estudios hidrogeológicos revelan la existencia de tres acuíferos, el primero se localiza en los aluviones cuaternarios de origen fluvial, el segundo se localiza en los derrames basálticos y el tercero en las calizas del Cretácico (Salinas, 1998). El área tiene un clima árido con un promedio de precipitaciones de alrededor de 500 mm/año, que se distribuyen, principalmente, entre mayo y octubre, y una evaporación de 1750 mm.

Este valle se caracteriza por tener suelos pobres y finos que se localizan sobre una capa de sedimentos aluviales. Un alto porcentaje de los suelos (90%) presenta una textura franco-arenosa; mientras que el resto tiene una textura arcillosa. Además, son suelos ligeramente alcalinos y con una capacidad media-alta de intercambio iónico.

Gran parte de las aguas residuales se encuentran embalsadas por la presa Endho, pero otra parte es conducida por el río Salado desde donde se desvía directamente a los canales de riego (figura 14.8). La presa Endho fue diseñada inicialmente con el propósito de almacenar agua superficial, pero en la práctica actúa como un sistema de oxidación parcial y dilución de las aguas residuales antes de su distribución por los canales de riego.

Parte de este valle conforma el Distrito de Riego número 03 (DR-03), que se creó en 1904; en aquel entonces era un área árida con pocos recursos de agua superficial y subterránea y la Ciudad de México tenía una población de menos de 1 millón de habitantes. En la actualidad la ciudad de México, con su área metropolitana, tiene más de 20 millones de habitantes y el área de riego ha crecido vertiginosamente, especialmente desde los años 50 cuando la población que generaba las aguas residuales se mantenía todavía en sólo 3 millones.

El DR-03 opera 210 Km de canales primarios y 365 Km de canales laterales para el riego de un área que tiene una extensión aproximada de 45.000 Ha, con 27.500 usuarios individuales de agua. Este sistema de canales fue construido entre 1926 y 1934. En la actualidad, se lleva a cabo un control sobre las prácticas de cultivo y riego con objeto de reducir el riesgo de transmisión de enfermedades patógenas a los agricultores y animales del área, así como a los consumidores de estos productos agrícolas.

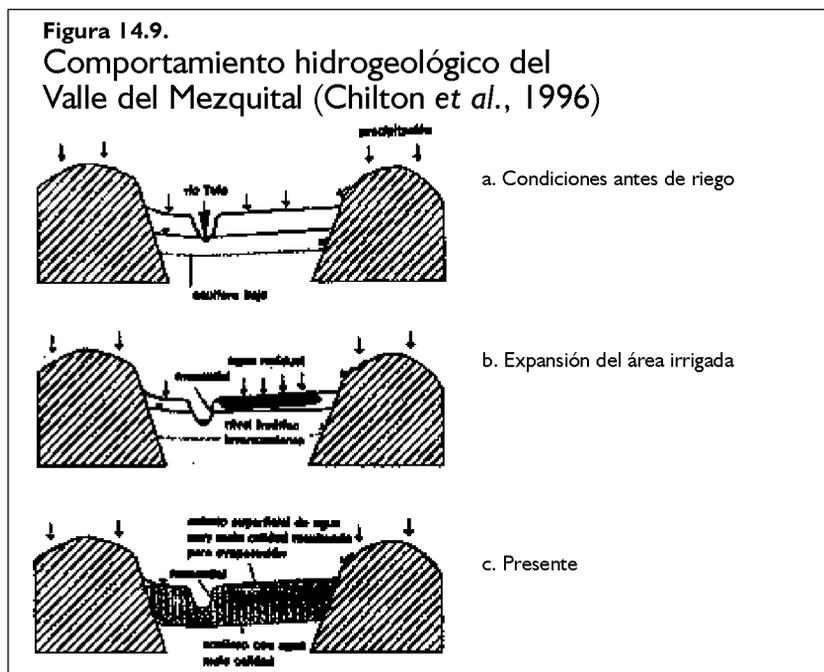
Dentro del DR-03, unas 20.000 Ha se cultivan en forma permanente con alfalfa como forraje. En el resto del distrito se cultiva maíz y otros cereales, dedicando algunas hectáreas para tomates, calabacitas, judías y chiles.

Efectos por el uso del agua residual

Recarga del acuífero

Un modelo conceptual permite suponer que antes del riego con agua residual, existían en el área dos unidades acuíferas semi-independientes pero con el incremento constante en las entradas de agua residual han aparecido nuevas zonas de descarga y manantiales (figura 14.9), siendo este nuevo acuífero el que se está utilizando para el abastecimiento de la población, así como para uso agrícola e industrial (Chilton et al, 1996).

Hay que tener en cuenta que las láminas de riego que se emplean son muy altas, hasta de 2.3 m/año, ya que la elevada salinidad del suelo de la región es lavada con el agua residual y como resultado se tiene una recarga artificial del acuífero de la zona. La recarga del acuífero, que inicialmente sólo se producía por infiltración de aguas de lluvia, en la actualidad se produce, casi exclusivamente, por infiltración de estos excedentes de riego, así como por infiltración desde los canales y balsas de riego. De los 38 m³/s de aguas residuales empleadas para riego se estima que se infiltran al acuífero 25 m³/s, lo que equivale de 10 a 15 veces la recarga natural. A princi-

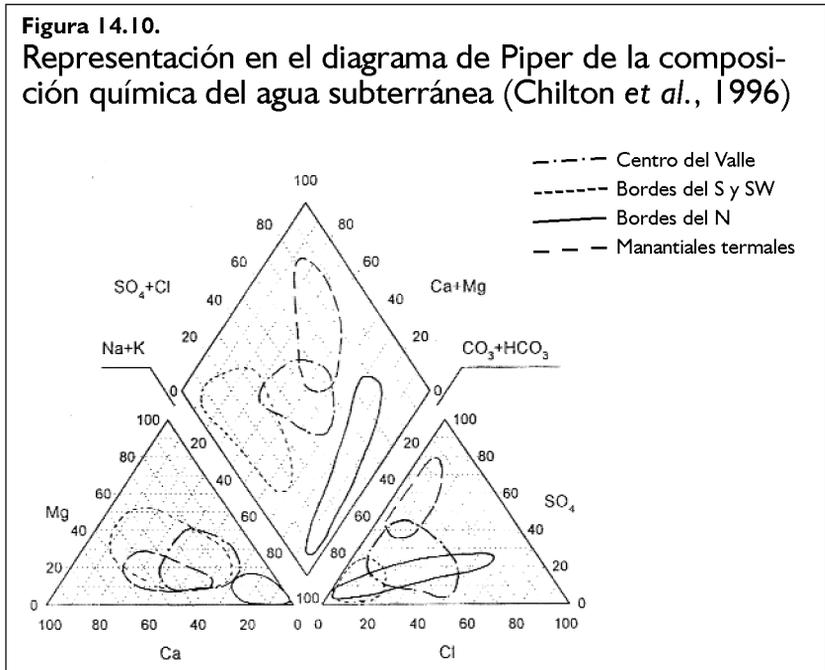


pios de siglo, el nivel de agua subterránea se encontraba a más de 50 metros de profundidad pero en la actualidad, y como consecuencia de la infiltración, el nivel piezométrico ha ascendido y, de hecho, varios pozos son de tipo artesiano con caudales que varían entre 100L/s y 600 L/s.

Otro efecto del ascenso del nivel piezométrico ha sido la aparición de áreas de descarga. En estas áreas se han tenido que construir unos 100 Km de canales de drenaje para reducir el encharcamiento y salinización del suelo. Por estos canales circula un caudal de 1,7 Hm³/día, el cual se descarga en el río Tula.

Impacto en la calidad del agua subterránea

La infiltración del agua residual ha cambiado las características físico-químicas del agua subterránea en el valle y puede inferirse la penetración del agua de baja calidad a profundidades significativas en el acuífero. El estudio hidrogeoquímico del acuífero en base a los iones mayoritarios y los elementos trazas permite identificar una recarga en los límites del valle, un agua subterránea con influencia geotermal y un agua subterránea influen-



ciada por el agua residual en el centro del valle (Figura 14.10).

Otra característica química del agua subterránea es la presencia de NO_3^- en concentraciones superiores a 80 mg/L. El origen de este nitrato está ligado a la gran cantidad de nitrógeno en el agua de riego, tanto en forma amoniacal como nítrica, con valores máximos de 39 y 22 mg N/L, respectivamente, y a la existencia de suelos arenosos en el valle que facilita el transporte de este elemento al acuífero.

Hay que tener en cuenta que el agua subterránea es utilizada en la zona para cubrir las diferentes necesidades tanto urbanas, industriales como agrícolas. Del acuífero se extraen 164 $\text{Hm}^3/\text{año}$, de los cuales el 33% se emplea para la industria, 25% en agricultura, 17% para consumo urbano y el 25% restante para otros fines. La dotación promedio del agua municipal es de 191 L/habitante y día y el 71% de la población cuenta con este servicio. El resto de la población toma el agua directamente de los pozos. La cobertura de drenaje de la zona es del 30% y la infraestructura de tratamiento es prácticamente nula.

Riego: El principal beneficio del riego con aguas residuales es el incremento en la productividad agrícola, como consecuencia del aporte de materia orgánica y nutrientes a los suelos del valle, en comparación con otras áreas de características sociológicas y económicas similares pero que emplean agua de primer uso (Cuadro 14.3).

Otro beneficio ha sido la mejoría en la estructura de los suelos debida, fundamentalmente, a la adición de la materia orgánica que está presente en el agua residual, observándose porcentajes de materia orgánica en el suelo de hasta el 6%. Sin embargo, la mayor parte de la superficie está erosionada y el horizonte de tepetate (una especie de caliche) se ubica a poca profundidad, lo cual limita la producción agrícola.

Un problema que puede suscitar el riego con aguas residuales es el que está relacionado con la presencia de metales pesados, los cuales pueden alterar el desarrollo de las plantas y ser introducidos en las cadenas alimenticias. Santos *et al.* (1998) han estudiado la presencia de Cd, Co, Cu, Ni, Pb y Zn en suelos y en 10 especies diferentes de vegetales que se cultivan en el DR 03. De acuerdo con los resultados analíticos obtenidos se concluyó que los metales pesados presentes en los suelos no superan los límites permisibles, con excepción del Pb que presentó un valor de 114 mg/Kg y del Zn con una concentración de 338 mg/Kg. En el caso de los cultivos, se comprobó que la calabacita absorbió mayor cantidad de Cu, Zn y Co, mientras que el nabo absorbió mayor cantidad de Cd y la avena de Ni.

Incremento de las enfermedades: Se ha determinado que la incidencia de las enfermedades gastrointestinales en esta zona es superior al promedio

Cuadro 14.4
Rendimientos de los cultivos en el
Valle del Mezquital según el tipo de agua de riego
(Jiménez y Chavéz, 1998)

Cultivo	Riego con agua residual Rendimiento Ton/Ha	Riego con agua primer uso Rendimiento Ton/Ha	Variación %
Maíz	5	2	150
Cebada	4	2	100
Tomate	35	18	94
Avena para forraje	22	12	83
Chile	12	7	71
Alfalfa	120	70	71
Trigo	3	1.8	67
Alubias	1	1.3	-23

nacional, llegando para algunos estratos de la población (niños en particular) a exceder 16 veces la media nacional (Cuadro 14.4).

En algunas muestras de aguas aplicadas sobre el terreno se han obtenido concentraciones de coliformes fecales que oscilan entre 10^3 y 10^8 NMP/100 mL. También se ha establecido que el contacto con las aguas residuales está asociado, específicamente, con un mayor riesgo de infección por helmintos (Cifuentes *et al.*, 1992), ya que se han detectado concentraciones de 130-135 HH/L en las aguas residuales que llegan a la presa Endho (Siebe y Cifuentes, 1993).

En relación con la contaminación química, Cortés (1993) señala la presencia de metales pesados, tales como Pb y Cd, en elevadas concentraciones en la sangre de la población.

Estrategias de control

Teniendo en cuenta que es necesario evitar las consecuencias negativas de la irrigación con aguas residuales, tanto en la salud de los agricultores como de los consumidores, es indispensable dar un tratamiento al agua residual antes de destinarla al riego. Dicho tratamiento debe a la vez controlar el problema microbiológico y mantener el aporte de nutrientes del agua residual (materia orgánica, nitrógeno y fósforo). Además, debido a la presencia

Cuadro 14.5

Comparación de la frecuencia de enfermedades hídricas en el Valle del Mezquital y en una zona que emplea agua de primer uso (Jiménez y Chávez, 1998)

Especie	Tasa de morbilidad			Relación
	Edad población afectada	Riego agua residual	Riego agua primer uso	
Ascaris lumbricoides	0 a 4	15.3	2.7	5.7
	5 a 14	16.1	1.0	16.0
	> 15	5.3	0.5	11.0
Giardia Lamblia	0 a 4	13.6	13.5	1.0
	5 a 14	9.6	9.2	1.0
	> 15	2.3	2.5	1.0
Etmamoeba hystolitica	0 a 4	4.0	7.3	1.0
	5 a 14	16.4	12.0	1.3
	> 15	16.0	13.8	1.2

de agua de lluvia en las descargas, el sistema de tratamiento que se debe seleccionar tiene que ser capaz de soportar altas variaciones en los caudales y responder a ciertos cambios bruscos de calidad. Por otra parte, el problema de la recarga del acuífero con agua salina debe de ser abordado.

A la vista de esta problemática, se ha definido una estrategia de control de este complejo problema de contaminación con base a dos cuestiones:

- a) Controlar los huevos de helmintos a $< 1\text{HH/L}$ y los coliformes a menos de 1000 NMP/100 mL, para continuar con la reutilización de aguas residuales.
- b) Efectuar un manejo del agua en el valle para reducir la entrada masiva de sales que afecta tanto a los suelos como al acuífero.
 - Para intentar buscar soluciones a la primera cuestión ya se han realizado varias experiencias aplicando diversas tecnologías de tratamiento a las aguas residuales de una de las salidas del drenaje de la Ciudad de México (Emisor Central) durante un período de un año. Uno de los procesos que dio mejor resultado fue un sistema de tratamiento primario avanzado acompañado de filtración y desinfección que permitió obtener un efluente de salida con características que cumplen con la norma mexicana para la reutilización de aguas residuales en agricultura (Jiménez y Chávez, 1998).
 - Otras opciones que se han señalado para mejorar el manejo del rie-

go con agua residual en esta zona son (Chilton *et al.*, 1996):

- Revestir los canales de distribución para reducir la infiltración.
- Mejorar la eficiencia del riego para minimizar la infiltración.
- Desviar aguas residuales para regar otras áreas más adecuadas.
- Instalar sistemas de tratamiento de diferentes niveles para los distintos efluentes, ya sea que se trate del agua residual de la Ciudad de México o de aguas residuales industriales dentro del valle.
- Incrementar la extracción del agua subterránea para la producción de cosechas con un valor más alto de mercado y/o para el mejoramiento del drenaje.

Conclusiones

La falta de tratamiento de las aguas residuales y su evacuación en canales no revestidos provoca contaminación de las corrientes receptoras, así como de los cuerpos de agua, generándose un fuerte impacto económico, ya que este agua pierde la mayoría de sus usos potenciales y queda limitada exclusivamente para riego y, en casos excepcionales, para la generación de energía. Cabe aclarar que aún cuando el riego con aguas residuales es posible bajo ciertas circunstancias, actualmente se lleva a cabo casi sin control alguno, ni en la calidad de las aguas residuales (que debieron ser tratadas), ni del tipo de cultivo a regar.

La infiltración de aguas residuales sin tratamiento, especialmente de aquellas que contienen sustancias tóxicas, metales pesados y compuestos orgánicos persistentes (no biodegradables), está provocando la contaminación de los acuíferos, en un proceso lento pero persistente y cuyo control presenta muchas dificultades. Si a este problema agregamos que el agua subterránea ha sido la fuente principal de abastecimiento de agua potable, debido a que, normalmente, no requiere de tratamiento previo para su consumo, lo cual ha provocado que se sobreexploten los acuíferos, podemos concluir que esta alternativa de abastecimiento urbano está seriamente amenazada.

