

Las aguas subterráneas en una cuenca de altura: el Valle de Toluca

La Cuenca Alta del Río Lerma, localizada en el Altiplano mexicano y dentro de la cual se ubica el Valle de Toluca, es un importante centro de actividades industriales y agropecuarias; consecuentemente, esta cuenca ha sufrido un aumento del número de sus habitantes con el consiguiente incremento de las necesidades de agua potable. A este hecho, hay que añadir la importación de agua subterránea que lleva a cabo la Ciudad de México para cubrir sus necesidades de abastecimiento humano, lo cual representa un caudal de $14 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal que se extrae de los acuíferos del Valle de Toluca y del Valle de Atlacomulco-Ixtlahuaca, ambos localizados en la cuenca. De estos dos valles, el que está sometido a una mayor explotación de sus aguas es el Valle de Toluca.

En el caso concreto de este último valle, la alta densidad poblacional está propiciada por el establecimiento y desarrollo de zonas industriales, por lo que éstas se han convertido en un polo de fuerte desarrollo económico donde se generan gran cantidad de desechos industriales y domésticos que han colaborado para que la Cuenca Alta del Río Lerma, sea considerada como una de las cuencas más contaminadas del país.

Además de la actividad industrial, el Valle de Toluca presenta una importante actividad agrícola ya que más del 78% de la superficie está dedicada a la agricultura (Díaz-Delgado *et al.*, 1998). Esta actividad agrícola lle-

va consigo la utilización de productos químicos, tales como fertilizantes y plaguicidas.

Ante esta problemática se planteó la necesidad de llevar a cabo un estudio hidrodinámico-hidrogeoquímico del acuífero que permitiera determinar cual era su grado de explotación y establecer las principales características físico-químicas del agua subterránea, para definir su posible contaminación y su calidad como agua potable. Hay que tener en cuenta que para el Valle de Toluca no existen investigaciones que hayan abordado la hidrogeoquímica del acuífero. Sólo se tiene referencia de un trabajo sobre la presencia de metales pesados en sus niveles someros (Madrigal y Llorente, 1993).

Descripción general del área

El área de estudio se encuentra en la porción central de la República Mexicana y más concretamente en zona central del Estado de México, siendo uno de los valles de mayor elevación del altiplano mexicano (Figura 6.1). El Valle de Toluca queda enmarcado dentro del Curso Alto del Río Lerma que comprende la vertiente norte de la Sierra Nahuatlaca-Matlazincas, así como la vertiente nororiental del Xinantecatl o Nevado de Toluca (4,690 m.s.n.m.). El Valle de Toluca tiene una elevación media de 2,570 m.s.n.m.

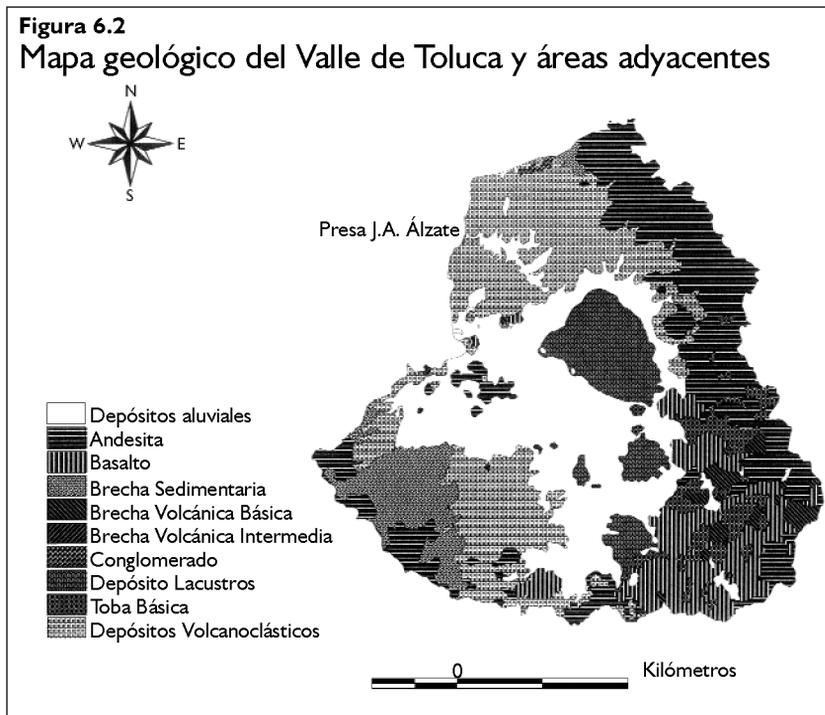


hasta la presa José Antonio Alzate. Aproximadamente, a 9 km aguas abajo de la presa, y a una altitud de 2.570 m.s.n.m., termina el curso alto del Río Lerma, al descender el escalonamiento tectónico del Valle de Atlacomulco-Ixtlahuaca formado por el bloque y sistemas de fallas de Perales.

El Valle de Toluca tiene una extensión cerca de los 700 km², con un eje mayor orientado de norte a sur con una longitud de casi 35 km y un eje menor orientado de este a oeste, con 20 km de longitud, aproximadamente. Sus límites son al norte, el volcán La Guadalupana, el Cerro El Aguila y la Sierra Monte Alto, al sur el volcán Tenango y el volcán Zempoala, al este la Sierra de Las Cruces y Las Iglesias y al oeste el volcán Xinantecatl (Nevado de Toluca) y la Sierra Morelos.

La zona de estudio se encuentra ubicada, específicamente, en la provincia fisiográfica denominada "Eje Neovolcánico Transmexicano" (Deman *et al.*, 1978), región constituida por una franja de naturaleza volcánica de tipo calcoalcalino, cuya edad corresponde al Cenozoico Superior.

La secuencia litológica está constituida por varios tipos de rocas volcáni-



cas del Terciario, fundamentalmente basaltos y andesitas, así como materiales piroclásticos y brechas, los cuales afloran en las sierras que circundan el valle (Figura 6.2). En el valle, se identifican sedimentos lacustres y aluviales que se encuentran intercalados con materiales clásticos de origen volcánico. A estos depósitos se les asigna una edad correspondiente al Plioceno Tardío – Cuaternario (Honorio y Hernández, 1982 y Herrera y Sánchez, 1994).

La mayor intensidad de precipitación en un día se presenta en las zonas más altas donde llueve entre 80 y 120 mm. En el resto de la cuenca se presentan intensidades entre 60 y 80 mm. Aproximadamente el 85 % de la precipitación ocurre entre los meses de mayo y octubre. La precipitación anual varía entre 1.300 mm en las áreas de mayor altitud y los 800 mm de la zona llana. En esta zona llana, que corresponde al Valle de Toluca, la temperatura promedio anual es del orden de 14°C, la máxima promedial es de 17°C y la mínima es de 0°C. En cuanto a la evaporación (Lesser *et al.*, 1992), cabe decir que los valores menores se presentan durante octubre y enero, con valores que oscilan entre 83 y 100 mm; a partir de febrero la evaporación se incrementa hasta alcanzar máximos de casi 150 mm en marzo y abril.

La elevada concentración de población en el valle es propiciada por el establecimiento y desarrollo de zonas industriales en lugares como Toluca, Lerma y Tlanguistenco, lo cual produce gran cantidad de desechos industriales y domésticos tanto líquidos como sólidos. Así mismo, en la zona existe una intensa actividad agrícola, siendo el cultivo predominante el maíz que llega a ocupar casi el 80% del suelo cultivable, asimismo, existen cultivos, a menor escala, de frijol, trigo, papas, avena y hortalizas.

Marco hidrogeológico

La zona de estudio se localiza en la provincia geohidrológica Faja Volcánica Transmexicana. Como características generales de esta provincia se pueden señalar la presencia de basaltos con alta permeabilidad debida, principalmente, al grado de fracturación, así como a la presencia de tubificaciones en los derrames y a la intercalación de material escoráceo. Estos acuíferos volcánicos fracturados están cubiertos, en los valles, por depósitos lacustres y aluviales, cuya permeabilidad es muy variable, por lo que se convierten en acuíferos confinados o semiconfinados que se caracterizan por tener un coeficiente de almacenamiento bajo. Los niveles de material piroclástico tienen una alta porosidad, pero su permeabilidad es baja funcionando como acuitardos. Los depósitos lacustres del Plioceno Tardío se caracterizan por su po-

ca permeabilidad por lo que también constituyen acuitardos. Los materiales aluviales no consolidados (gravas, arenas, arcillas y limos) forman acuíferos someros cuya transmisividad varía con base al tamaño de grano y al espesor del estrato. Como basamento de los valles o intercalados en el paquete sedimentario suelen aparecer rocas andesíticas que actúan como materiales impermeables de base. En el caso de los valles tectónicos, este basamento se puede encontrar a cientos de metros de profundidad (Velázquez y Ordaz, 1994).

En el caso concreto del Valle de Toluca, el acuífero está formado por materiales detríticos marcadamente heterométricos, con predominio de gravas, arenas y conglomerados con matriz arcillo-limosa aunque también se pueden diferenciar intercalaciones de niveles de piroclastos y tobas. El sistema está formado por varios niveles acuíferos superpuestos que constituyen un acuífero multicapa, pero la existencia de cierta continuidad hidráulica permite considerarlo un sistema de flujo único. No obstante, existen diferencias significativas de carga hidráulica (Unitecnia, 1996).

Estos materiales detríticos reposan sobre un basamento constituido por material volcánico consolidado cuya naturaleza es variable. En algunos sondeos realizados por la Gerencia Regional del Valle de México se ha establecido la presencia de basaltos y andesitas a profundidades superiores a los 100 metros (Unitecnia, 1996).

Los límites de este acuífero son:

- Al norte el volcán La Guadalupeana, el cerro El Aguila y la Sierra Monte Alto y el Valle de Ixtlahuaca-Atlacomulco que define un límite abierto ya que existe una conexión hidráulica entre los dos valles.
- Al sur el volcán Tenango y el volcán Zempoala, que también constituye un límite abierto entre los materiales detríticos y los volcánicos fracturados que afloran en esta zona.
- Al este la Sierra de Las Cruces y Las Iglesias formando un límite permeable ya que se establece una conexión entre los depósitos detríticos y los afloramientos de materiales volcánicos fracturados.
- Al oeste el volcán Xinantecatl o Nevado de Toluca y la Sierra Morelos, que definen un límite abierto por lo que existe una comunicación hidráulica entre los acuíferos fracturados y el material detrítico que constituye el valle.

La explotación de los recursos hídricos del valle se inició en las décadas de los 40 y 50 con una serie de obras para captar las aguas de los manantiales que alimentaban las Lagunas de Almoloya del Río y por tanto al río Lerma. Una de estas obras fue la excavación de varias galerías, conectadas a un dren, captando los manantiales localizados en Almoloya del Río, Tex-

caltengo, Alta Empresa y Ameyalco. Otras obras consistieron en la instalación de pozos en el margen oriental de las lagunas que entraron en operación en 1953, todo lo cual implica un caudal de explotación entre 3.5 y 4.0 m³/s. Desde entonces, el agua obtenida se transporta hacia la Ciudad de México a través de un acueducto de Atarasquillo a Dos Ríos, que cruza las Sierra de las Cruces,

Por otro lado, alrededor, empezó la instalación del llamado corredor industrial Toluca – Lerma, donde se desarrolló y se está desarrollando una intensa actividad industrial que se refleja en producción industrial del Estado de México, que llegó a ocupar el segundo lugar de la República entre 1949 y 1979.

Esta actividad industrial conllevó un aumento de la densidad de población en el valle, lo cual a su vez ocasionó un incremento de las necesidades de agua para cubrir la demanda industrial y urbana, mismas que se cubrieron con la perforación de pozos localizados en todo el valle.

La crítica evolución de la disponibilidad de volúmenes de agua ocasionó que, el 10 de agosto de 1965, se promulgara un decreto presidencial que establecía la veda en el acuífero, pero en ese mismo año la demanda de agua en la Ciudad de México no pudo ser cubierta firmándose un acuerdo entre el Departamento del Distrito Federal, la Secretaría de Recursos Hidráulicos y el Gobierno del Estado de México para aumentar las extracciones en la zona del río Lerma, anulando el decreto presidencial (Boehm y Sandoval, 1999).

Con base en este acuerdo, en 1970 se concluyeron las obras de 230 pozos y de 170 Km de acueducto en los valles de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca que aportan importantes volúmenes a la ciudad de México. Algunos de estos pozos se encuentran localizados justo en la zona de transición entre la zona lacustre y el borde montañoso.

En la actualidad el acuífero del Valle de Toluca está sometido a veda, lo cual implica que no se pueden construir nuevas captaciones.

Características hidrodinámicas

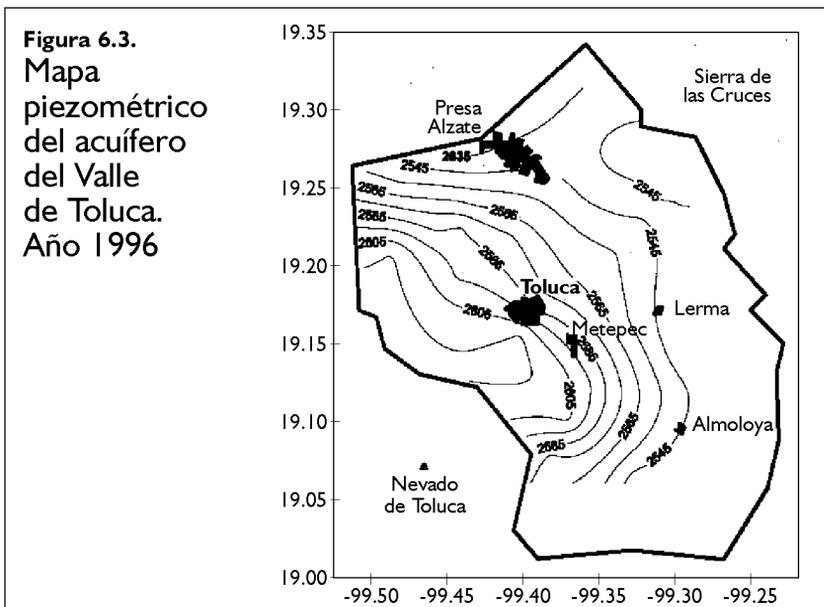
Los parámetros hidráulicos del acuífero del Valle de Toluca abarcan un amplio rango debido a la variabilidad litológica y geométrica de los depósitos. De todos modos se pueden diferenciar zonas en función de la transmisividad: La zona correspondiente al pie de monte de la Sierra de Las Cruces (NE), posee valores que alcanzan hasta los 13.000 m²/día, el sector de Lerma, una transmisividad media de 950 m²/día, el área de Almoloya del Río (SE) con valores que en torno a 22.000 m²/día y la parte central con una

transmisividad que oscila entre 90 y 400 m²/día. El coeficiente de almacenamiento varía entre 0.3 y 0.9% (CCRECRL, 1993).

En relación con la evolución de la superficie piezométrica hay que señalar que la intensa extracción del agua subterránea ha provocado el descenso del nivel piezométrico en casi todo el acuífero.

En el mapa piezométrico correspondiente al período octubre - diciembre de 1996 (6.3), se puede apreciar que la recarga principal proviene del Xinantecatl y que la circulación del agua subterránea es hacia el centro del valle, distribuyéndose en tres direcciones, hacia el SE y E hasta llegar al pie de la Sierra de Las Cruces, y hacia el N para dirigirse hacia el valle de Atlacomulco-Ixtlahuaca. El principal rasgo que se puede apreciar es la influencia de la batería de pozos instalada al pie de la Sierra de Las Cruces para extraer agua destinada a la Ciudad de México, lo cual implica que el flujo proveniente de la sierra en dirección al Valle ha sido interceptado por la batería de pozos, perdiéndose su influencia hacia el interior del valle.

Por otro lado, en el área de la Presa José Antonio Alzate se observa cierta recarga desde ésta hacia el acuífero, pues la pendiente de la superficie piezométrica se reduce sensiblemente, apreciándose como el flujo del agua subterránea tiende a dirigirse hacia el río Lerma.



El mapa de isodescensos para el período 1971-1996 (Figura 6.4) presenta un cono de depresión piezométrica en el área de Toluca, con un descenso que alcanza los 35 metros, lo cual indica que la tasa de abatimiento ha sido de 1.4 m/año. En el caso del área de la presa José Antonio Alzate el descenso es prácticamente nulo.

Para efectuar el estudio de la evolución temporal se han elegido dos puntos acuíferos pertenecientes a la red de observación que existe en el acuífero. Estos piezómetros son el pl 144, localizado en el sector sur del Valle de Toluca, y el pl 201 ubicado en el centro urbano de la ciudad de Toluca. Para estos piezómetros se tiene un período de observación de 28 años, con medidas anuales que se efectuaban entre los meses de octubre y noviembre.

La figura 6.5 muestra la evolución del nivel piezométrico para el punto pl 144. Se aprecia claramente la caída del nivel desde el inicio de la toma de datos, con un descenso total al final del período de observación de casi 30 metros, lo que indica una velocidad de descenso de casi 1 metro por año. Una evolución similar se puede apreciar en el punto pl 201, aunque en este caso la velocidad de abatimiento ha sido mayor, de 1.7 metros al año (Figura 6.6).

Otro efecto de la explotación de los recursos hídricos subterráneos ha si-

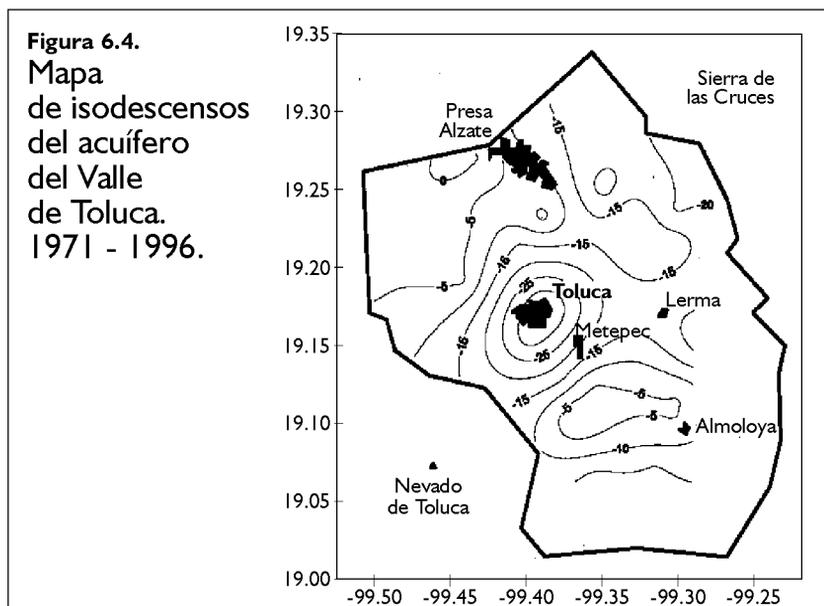
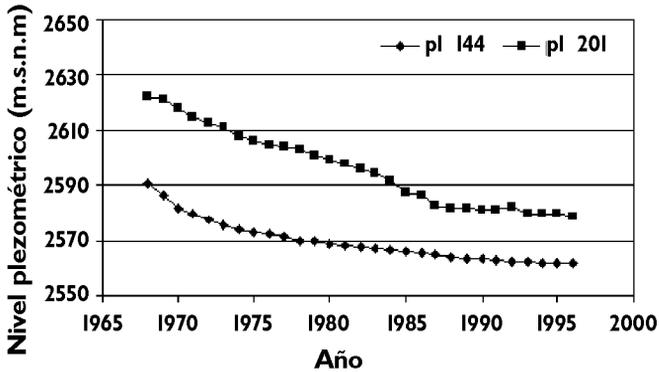


Figura 6.5

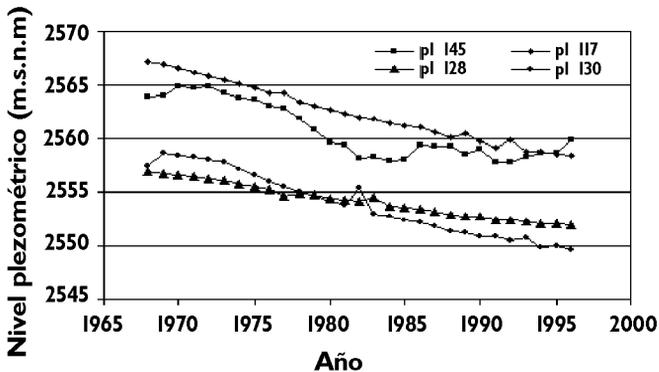
Evolución del nivel piezométrico en el punto pl 144 y 201 (período 1968-1996)



do la desaparición casi total de la zona lagunar de Almoloya del Río. Para efectuar el estudio de la evolución temporal del nivel piezométrico en esta zona lagunar se eligieron 4 puntos pertenecientes a la red de observación que existe en el acuífero. La figura 6.6 muestra la evolución del nivel piezométrico en estos puntos para un período de tiempo comprendido entre

Figura 6.6

Evolución piezométrica en diferentes puntos acuíferos localizados en la zona lagunar de Almoloya del Río.



1968 - 1996. Se observa claramente como ha ocurrido un descenso gradual del nivel piezométrico por efecto del bombeo y a la disminución de los caudales de recarga que procedían de los manantiales. Por otra parte, en el caso del piezómetro pl 145, localizado en las proximidades de la primera laguna (Laguna del Almoloya) se aprecia una recuperación del nivel a partir de la década de 1980, la cual está relacionada con la construcción del bordo, que ha permitido cierta recarga hacia el acuífero.

Como ya se ha comentado, las tres lagunas de Almoloya se alimentaban, principalmente, con las aguas procedentes de diversos manantiales y de las de escorrentía superficial. Para establecer los caudales que circulaban entre las lagunas y a las salidas de éstas, las autoridades responsables instalaron dos estaciones hidrométricas. La estación Atenco, localizada entre las dos primeras lagunas y que tiene un período de registro desde 1942 a 1985 (período sin datos de 1961 a 1970), y la de San Bartolo, situada a la salida de la tercera laguna, donde se considera que nace el río Lerma, con un período de registro comprendido entre 1942 y 1970

El estudio de la evolución de los caudales de estas dos estaciones (figura 6.7) refleja el efecto de las obras que se hicieron para captar agua con destino a la Ciudad de México, así como de las obras de almacenamiento del agua de las lagunas. La infraestructura hidráulica instalada modificó el régimen de alimentación de estas lagunas, por lo que hoy en día se puede considerar que la única fuente de alimentación de la zona son los escurrimientos superficiales directos de la cuenca.

En la figura 6.7 se puede apreciar en la estación hidrométrica de Atenco que, en las últimas décadas para las cuales se tiene registro, la circulación de aguas entre las dos primeras lagunas es ocasional, tanto por efecto de las obras de captación como por la represa construida aguas arriba de la estación hidrométrica. La represa comenzó a utilizarse en abril de 1951 y en ocasiones se agregan tabloneros que retienen el agua a niveles superiores al de la pantalla de concreto, la cual tiene una altura de 0.9 metros (elevación de la cresta 2,574.43 m.s.n.m.).

En el caso de la estación de San Bartolo, el descenso de caudales se puede apreciar a lo largo de los años 50 de forma muy clara, posteriormente este descenso no es tan marcado ya que esta laguna recibe importantes aportes de aguas superficiales, los cuales están en función de la pluviometría de la región.

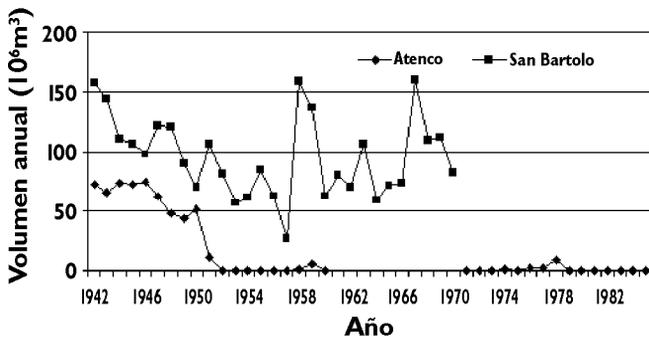
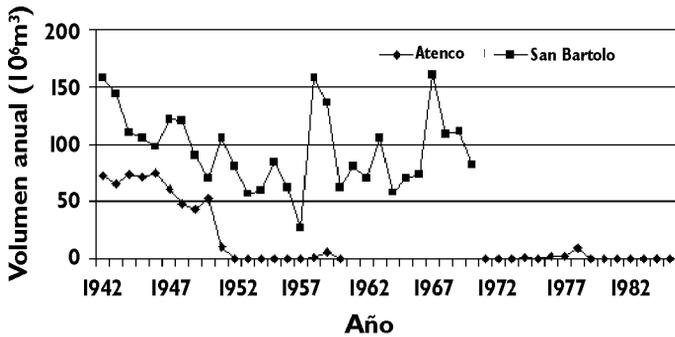
Todo este proceso y las políticas de explotación de los recursos hídricos subterráneos en la cuenca ha traído consigo que la extensión de la zona lacustre haya ido disminuyendo con los años (Cuadro 6.1), pues los volúmenes de agua aportados por los manantiales han ido disminuyendo y, además,

se ha producido un descenso generalizado del nivel piezométrico.

Otra prueba de las consecuencias de este proceso de desecación de la zona lacustre es que antes de iniciarse en la región existían islotes, como el de Mirafuentes (Almoloya del Río) e islas temporales (en épocas de lluvias), como San Antonio la Isla, San Juan la Isla y San Pedro Tultepec de Quiroga la Isla, y de ahí provienen sus nombres (Albores, 1995).

Otros fenómenos ligados a la fuerte explotación del acuífero han sido la

Figura 6.7
Evolución anual de los volúmenes de agua observados en las estaciones hidrométricas de Atenco y San Bartolo.



Cuadro 6.1
Superficies de los cuerpos de agua (vasos)
de la zona lacustre según varias referencias.
 Datos en Km².

	SRH (1969)	Albores (1995) Década 70s	IPESA (1984) Lluvia	SARH (1986) Estiaje	
Laguna de Almoloya	29	50	33	0.2	32
Laguna de Tlaltizapan	40	25	19	0.1	26
Laguna de San Bartolo	32	10	34	0.3	25
TOTAL	101	85	86	0.6	83

Fuente: SRH Secretaría de Recursos Hidráulicos

disminución de los caudales en los manantiales y la aparición de grietas en el terreno que parecen estar relacionados con asentamientos producidos por el abatimiento del nivel piezométrico (Unitecna, 1996).

En el informe elaborado para la Comisión Coordinadora para la Recuperación Ecológica de la Cuenca del Río Lerma (CCRECRL, 1993) se realizó un balance hidráulico para el acuífero pero no se indica a que período de tiempo corresponde. Las entradas totales se cuantificaron en 380 Hm³/año, de los cuales 101 Hm³/año proviene de la alimentación lateral desde el Xinantecatl (Nevado de Toluca), 198 Hm³/año por alimentación lateral desde la Sierra de Las Cruces y 81 Hm³/año por infiltración directa del agua de lluvia. Las salidas se valoraron en 385 Hm³/año, estas salidas se producen por descargas subterráneas hacia el valle de Ixtlahuaca-Atlaconulco con un valor de 2 Hm³/año y por bombeo, el cual se cuantifico en 383 Hm³/año. El balance global del acuífero indica un desequilibrio entre entradas y salidas, ya que las salidas son superiores a las entradas en 5 Hm³/año.

Del volumen total extraído, 163 Hm³/año se utilizan en el mismo Valle de Toluca, los cuales se reparten en un 79 % para abastecimiento urbano, 12.9 % para uso industrial y 8.1% dedicado a las actividades agropecuarias. Por otra parte, la ciudad de México recibe de este acuífero 220 Hm³/año para cubrir sus necesidades de agua potable.

El modelo hidrogeológico conceptual se basa en un flujo regional que se realiza desde las partes altas hacia el centro del valle, continuando en dirección al noreste siguiendo más o menos la traza del río Lerma. La recarga del acuífero se realiza en las zonas de mayor altitud a través de las rocas basál-

ticas – andesíticas aflorantes, que dado su nivel de fracturamiento poseen excelentes características hidráulicas y la descarga se produce casi exclusivamente por bombeo, lo cual ha provocado la aparición de conos de descenso del nivel piezométrico.

Características hidrogeoquímicas

El estudio hidrogeoquímico histórico se ha basado en las campañas de muestreo que anualmente realiza, desde 1991, la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado de México (CEAS), durante los meses de mayo y junio. En este trabajo solamente se presentan los resultados de las campañas de 1993 (12 puntos de muestreo), 1995 (54 puntos de muestreo) y 1997 (41 puntos de muestreo).

Los muestreos se realizaron en varios sondeos de abastecimiento urbano que se localizan en los municipios de Almoloya de Juárez, Calimaya, Lerma, Metepec, Toluca, Oztolotepec y Zinacantepec. Los sondeos tienen características similares de construcción, con profundidades en torno a los 250 metros y cementados en las primeras decenas de metros. Casi todos estos sondeos explotan materiales detríticos de origen volcánico, fundamentalmente tobas y brechas formadas por fragmentos de andesitas y basaltos, los cuales constituyen uno de los niveles acuíferos del Valle de Toluca, al que se le podría llamar acuífero profundo.

Una vez recogidas las muestras de agua, éstas fueron analizadas en el Laboratorio de Control de Calidad del Agua del Gobierno del Estado de México. Los parámetros químicos determinados fueron: bicarbonato, sulfato, cloruro, nitrato, calcio, magnesio, sodio y potasio. Así mismo, se determinó conductividad, pH, sólidos disueltos, elementos minoritarios, como F, Fe y Mn, y elementos traza, como Al, As, Ba, Cd, Cu, Cr total, Hg, Pb y Zn.

En 1998, el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) realizó una campaña de muestreo que incluyó 39 puntos acuíferos distribuidos en todo el Valle de Toluca. Las muestras de agua se analizaron en el Laboratorio de Calidad del Agua del CIRA, determinándose pH, conductividad, bicarbonato, sulfato, cloruro, nitrato, calcio, magnesio, sodio y potasio.

La toma de muestras, su conservación y la determinación de los parámetros se llevó a cabo siguiendo las normas vigentes en México, las cuales están basadas en los métodos propuestos por la APHA, AWWA y WPCF (1989).

Como tratamiento de datos se elaboraron los mapas de isocontenidos de aquellos parámetros que presentaron mayor interés. Estos mapas se trazaron aplicando el programa SURFER V.6 (Golden Software, Inc, 1997).

Cuadro 6.2

Características físico-químicas del agua subterránea del Valle de Toluca para las campañas de 1993, 1995 y 1997 (unidades en mg.L⁻¹, excepto conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$).

	A. Potable	Año 1993				Año 1995				Año 1997			
	Limite	Min	Max	\bar{x}	D.S.	Min	Max	\bar{x}	D.S.	Min	Max	\bar{x}	D.S.
PH	6.5-8.5	7.5	8.1	7.8	0.2	6.6	8.5	7.6	0.3	7.2	8.0	7.6	0.2
Conduct.		155	297	231	46	117	466	226	74	111	351	219	58
HCO ₃ ⁻		90	166	131	25	63	264	126	39	71	264	123	38
SO ₄ ²⁻	400	3	20	9	5	1	117	8	18	1	21	7	5
Cl ⁻	250	6	16	14	3	6	52	14	8	6	24	13	4
NO ₃ ⁻	43	0.7	28.9	7.6	8.7	0.3	38.1	8.6	8.3	0.1	29.6	5.5	6.5
Mg ²⁺		6	15	10	2	6	33	14	5	8	29	13	4
Ca ²⁺		5	11	7	2	6	32	13	5	5	21	12	3
Na ⁺	200	18	55	39	11	6	37	19	8	6	43	20	8

También se utilizó el diagrama Piper para definir las distintas facies hidroquímicas presentes en el agua.

Entre las técnicas estadísticas utilizadas cabe señalar el análisis multivariante que se aplicó sobre una matriz de dimensiones $n \times m$, donde n es el número de observaciones y m , el de variables (Davis, 1986; Bisquerra, 1989). Cada observación corresponde a un análisis físico-químico de fecha y posición diferente y las variables son cada una de las características físico-químicas determinadas en las muestras. Este tipo de estudio estadístico se puede utilizar, por ejemplo, para establecer la relación entre diferentes parámetros físico-químicos (Morell et al, 1996).

Rasgos generales

Datos históricos

En el Cuadro 6.2 se exponen las principales características físico-químicas del agua subterránea muestreada durante las campañas de 1993, 1995 y 1997, con base a valores máximos, mínimos y medios. Como rasgo hidrogeoquímico básico se puede señalar el predominio de los iones bicarbonatos y magnesio y la baja presencia de nitratos. Así mismo, se aprecia que los va-

Cuadro 6.3

Características físico-químicas del agua subterránea del Valle de Toluca para la campaña de 1998

(unidades en mg.L-1, excepto conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$).

	Limite	Min	Max	8	D.S.
PH	6.5-8.5	6.3	7.8	6.7	0.3
Conduct.		168	978	342	178
HCO₃⁻		53	223	98	37
SO₄²⁻	400	2	252	19	44
Cl⁻	250	1	71	7	11
NO₃⁻	43	0.4	68	9	12
Mg²⁺		4	44	11	8
Ca²⁺		7	46	13	8
Na⁺	200	9	45	20	8
K⁺		2	11	4	2

lores obtenidos para algunos de los parámetros establecidos en la norma sobre agua potable (NOM 127-SSA1, 1994) están por debajo del límite máximo.

Campaña de 1998

En esta campaña se obtuvieron valores muy similares a los que se presentaron en anteriores muestreos; sólo cabe señalar una mayor presencia de sulfatos en algunos pozos, lo cual repercute en valores de conductividad más elevados (Cuadro 6.3). También cabe destacar valores de nitratos superiores a los 50 mg L⁻¹ (por encima del límite máximo para agua potable), aunque la mayoría de pozos presentan valores inferiores a los 10 mg L⁻¹.

La mineralización coincide con la que teóricamente debe de tener un agua subterránea en ambiente volcánico; los feldespatos contribuyen con sodio, calcio y potasio, y los piroxenos y biotitas con calcio y magnesio. La presencia de sulfatos y cloruros es baja ya que las rocas volcánicas contienen dichos iones en poca cantidad. (Custodio y Llamas, 1983; Appelo y Postman, 1993). Paralelamente, se observa que el valor medio de cloruro suele ser más alto que el del sulfato, lo cual indicaría una recarga de agua super-

ficial causada por la infiltración de agua de lluvia.

Mapas de isocontenidos

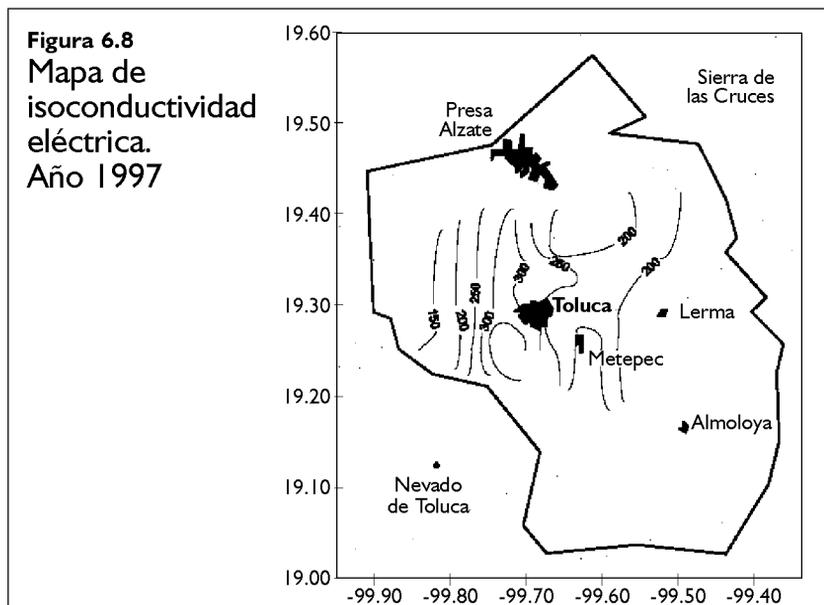
Datos históricos

En la figura 6.8 se presentan los mapas de isovalores correspondientes a la conductividad y en la figura 6.9 el de los bicarbonatos, siendo ambos mapas para el muestreo de 1997. Se ha elegido la conductividad como un indicador del grado de mineralización del agua subterránea y, por otro lado, se ha considerado el bicarbonato por ser el anión mayoritario.

En el caso de la conductividad, se observa como los valores máximos, superiores a $300 \mu\text{Scm}^{-1}$, se encuentran en el área en donde la intensidad de bombeo es mayor. La distribución de estas isolíneas es muy semejante a la que se obtiene cuando se traza el mapa de isocontenidos en bicarbonato, lo cual indica que la mineralización del agua está estrechamente relacionada con la presencia de este ión.

Campaña de 1998

Los mapas de isoconductividad y de isocontenidos en ión nitrato para el



muestreo de 1998, se presentan en las figuras 6.10 y 6.11, respectivamente. En el mapa isoconductividad se puede apreciar como el valor de este parámetro aumenta en la dirección del flujo del agua subterránea indicando el aumento de la salinidad del agua a medida de que ésta recorre una mayor distancia. Los mínimos valores se dan al pie del Xinantecatl (Nevado de Toluca), por donde se recarga el acuífero, y los máximos en la zona de Lerma – Toluca, donde se dan el mayor descenso del nivel piezométrico.

En el caso del ión nitrato, se observa como las máximas concentraciones se presentan en el sector central del acuífero, donde el grado de explotación es más importante ya que es donde se define el mayor cono de descenso del nivel piezométrico y donde la densidad de actividades antrópicas es más elevada. Esta importante correlación entre estos dos fenómenos y el mayor contenido en nitratos nos indica el origen contaminante de este compuesto químico, cuya presencia está ligada tanto a actividades agrícolas (fertilizantes) como urbanas (aguas residuales). A pesar de esta alta presencia de nitratos en determinados puntos del acuífero, su nivel de concentración es más bien bajo, pues casi todo el acuífero presenta concentraciones inferiores a 20 mg L⁻¹.

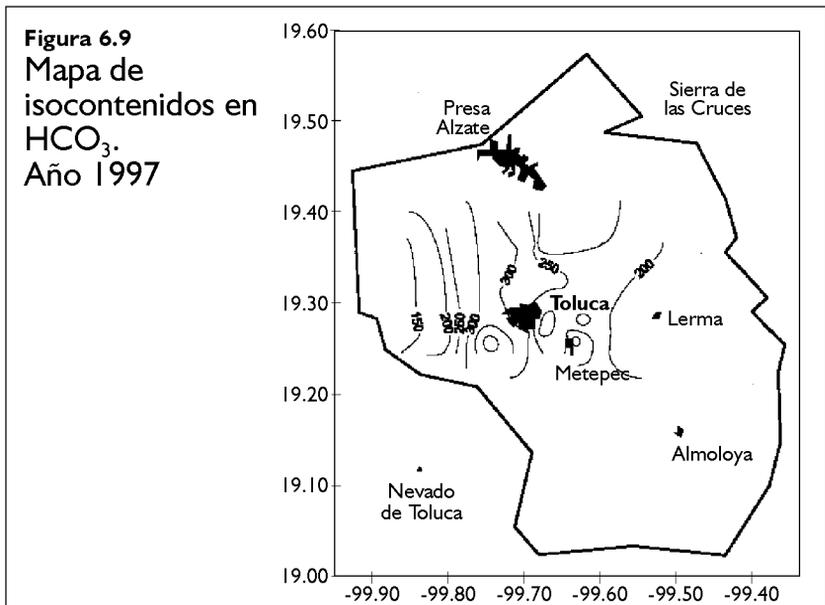


Figura 6.10
Mapa de
isoconductividad
eléctrica.
Año 1998

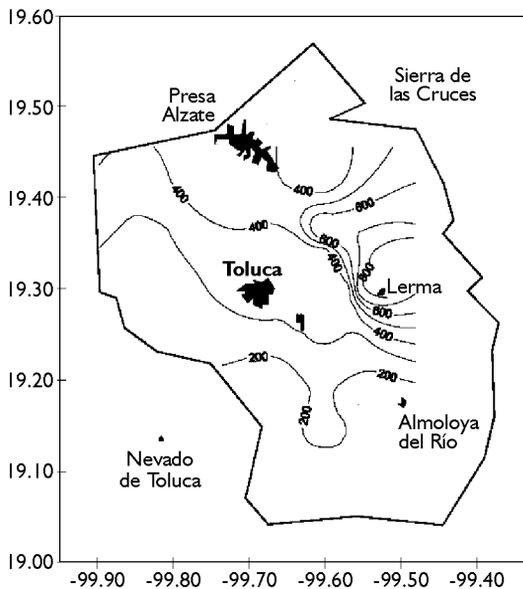
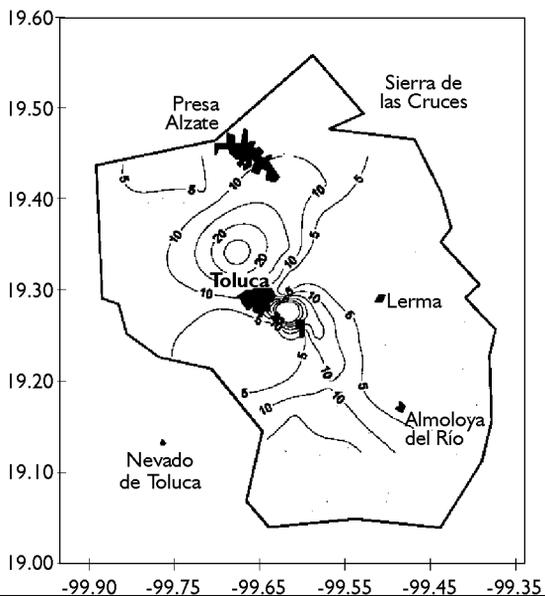


Figura 6.11
Mapa de
isocontenidos
en ión nitrato.
Año 1998



Caracterización de facies hidroquímicas

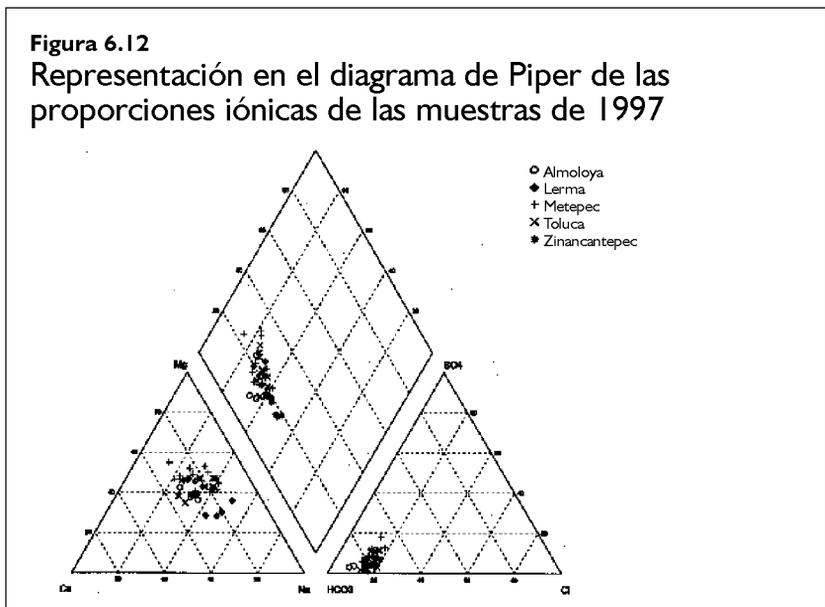
Datos históricos

La facies hidroquímica del agua subterránea en los acuíferos constituidos por rocas volcánicas suele ser del tipo bicarbonatada cálcico-magnésica, en las rocas básicas (basaltos, andesitas), y del tipo bicarbonatada cálcico-sódica, en las rocas volcánicas de tipo ácido, como son las traquitas y riolitas (Custodio y Llamas, 1986).

En la figura 6.12 se presenta el diagrama de Piper correspondiente a la campaña efectuada en 1997. Como rasgo general se puede indicar que el agua subterránea es, fundamentalmente, bicarbonatada magnésico-sódica, lo cual está en consonancia con la naturaleza litológica del acuífero. Además de esta facies se observa la existencia de otras tres familias hidroquímicas, aunque con menor representación, que se diferencia en función del tipo de catión predominante. La familia I corresponde a una facies magnésica, la familia II es un agua del tipo magnésica-cálcica y la familia III que presenta una facies sódica-magnésica; apreciándose una continuidad entre las familias hidroquímicas. Esta variabilidad en el tipo de catión predominante puede ser indicativa de un proceso de intercambio iónico entre el sodio y los io-

Figura 6.12

Representación en el diagrama de Piper de las proporciones iónicas de las muestras de 1997



nes calcio y magnesio.

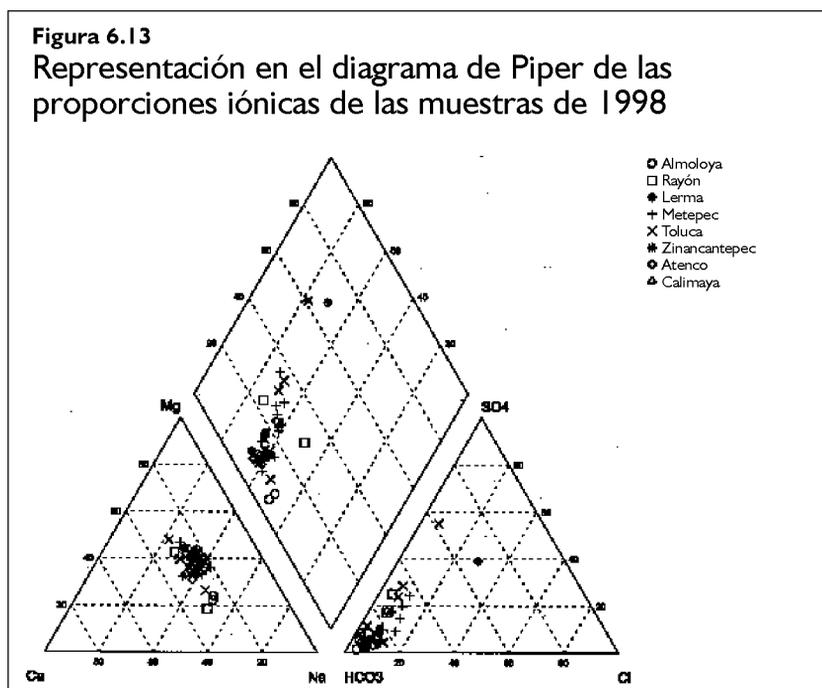
Campaña de 1998

La distribución de las muestras dentro del diagrama de Piper (Figura 6.13), es semejante a la obtenida para las campañas llevadas a cabo en años anteriores, lo cual indica que el quimísmo de las aguas subterráneas en esta zona no ha sufrido grandes variaciones con el paso del tiempo.

Metales pesados en el agua subterránea

En el cuadro 6.4 se presentan los contenidos de Al, As, Ba, Cd, Cu, Cr total, Hg, Pb, Fe, Mn, F y Zn determinados en las muestras recogidas en las campañas de 1993 y 1997 (en la campaña de 1995 no se llevaron a cabo los análisis correspondientes a estos elementos).

El contenido en dichos elementos es heterogéneo, pero en ningún caso



Cuadro 6.4

Concentración de metales pesados en el agua subterránea del Valle de Toluca para las campañas de 1993 y 1997 (unidades en mg.L-1).

	A. potable Limite	1993 Min	1997 Max		D.S.	Min	Max		D.S.
Al	0.20					0.030	0.203	0.098	0.038
As	0.05	0.001	0.007	0.004	0.004	0.004	0.051	0.026	0.015
Ba	0.70	0.001	0.102	0.030	0.033	0.001	0.106	0.039	0.036
Cd	0.005	0.001	0.006	0.003	0.002	0.001	0.003	0.001	0.001
Cu	2.00	0.006	0.064	0.022	0.020	0.002	0.075	0.038	0.023
Cr Total	0.05					0.012	0.030	0.021	0.007
Hg	0.001					0.001	0.041	0.002	0.005
Pb	0.025	0.004	0.009	0.007	0.004	0.002	0.018	0.008	0.005
Fe	0.30	0.01	0.10	0.05	0.04	0.01	2.51	0.15	0.39
Mn	0.10	0.01	0.13	0.05	0.05	0.01	0.22	0.03	0.04
F	1.50	0.10	0.25	0.20	0.05	0.02	1.24	0.26	0.19
Zn	5.00	0.010	0.999	0.129	0.326	0.004	0.168	0.047	0.045

se superan los límites vigentes establecidos en México para agua potable a excepción del Fe y Mn. La existencia de todos estos iones está relacionada con los materiales volcánicos que existen en la zona (Custodio y Llamas, 1983; Carrillo, 1994; Huizar-Alvaréz, 1997). En el caso concreto del Fe y Mn no se considera la posibilidad de un origen antrópico ya que sus concentraciones son muy bajas y no parecen estar relacionados con la presencia de ningún otro compuesto químico que indique contaminación.

En las figuras 6.14 y 6.15 se presentan los mapas de isovalores correspondientes al hierro y al manganeso para el año 1997. Tanto en el caso del ión Fe como del Mn es posible apreciar como su presencia disminuye en la dirección del flujo de agua subterránea. El comportamiento de ambos iones está controlado por fenómenos de oxidación - reducción, los cuales son especialmente importantes en relación con la solubilización del hierro y también del manganeso, el cual se comporta de forma similar aunque es mucho menos abundante; estos iones se pueden disolver en medios reductores y precipitar con mucha facilidad cuando el medio es oxidante. En el caso del acuífero del Valle de Toluca se está en presencia de un medio oxidante por lo que el descenso en las concentraciones de ambos iones podría ser debido

Figura 6.14
Mapa de
isocontenido en
ión hierro (total).
Año 1997

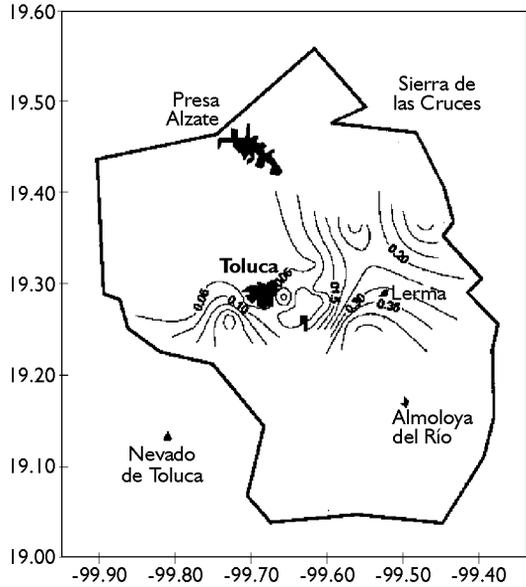
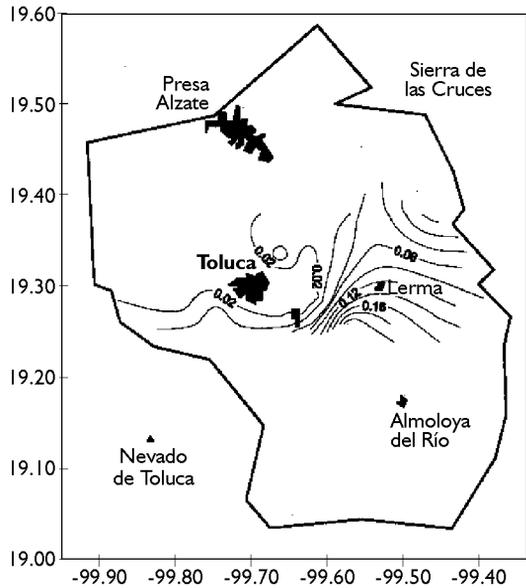


Figura 6.15
Mapa de
isocontenidos en
ión manganeso.
Año 1997



a fenómenos de precipitación (Custodio y Llamas, 1983; Deutsch, 1997).

Conclusiones

El agua subterránea del acuífero profundo del Valle de Toluca presenta una baja mineralización, con valores de conductividad eléctrica inferiores a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El anión más abundante es el bicarbonato y entre los cationes, el magnesio y el sodio. Este quimismo es el resultado de la mezcla de dos aguas, la que procede de los acuíferos volcánicos fracturados que bordean el valle y la del agua de lluvia y riego que se infiltra.

Los análisis químicos indican un bajo grado de contaminación; únicamente se encuentran concentraciones superiores a la norma vigente para agua potable en México en el caso del Fe, Mn y nitratos. La presencia de Fe y Mn está relacionada con la mineralogía de las rocas volcánicas que existen en la cuenca por lo que no es necesario invocar un proceso de contaminación antrópica.

La existencia de nitratos en concentraciones superiores a 50 mg/l parece indicar cierta contaminación de origen agrícola por el uso de fertilizantes y/o vertido de aguas residuales.

Finalmente, se puede señalar que, a pesar del alto grado de contaminación que presenta la cuenca, el agua subterránea del acuífero profundo presenta un mínimo grado de contaminación por efecto de la protección que ejercen los materiales suprayacentes, algunos de los cuales conforman acuitardos.