

03041

2



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

RECEBIDA EN LA SECRETARIA DE EDUCACION PUBLICA
25/11/82

INSTITUTO DE ECOLOGIA

**ANÁLISIS ESPACIAL DE FUENTES CONTAMINANTES
DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA ZONA
METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

**TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN ECOLOGÍA BÁSICA**

PRESENTA

ERNESTO SOTO GALERA

25/11/82



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
INSTITUTO DE ECOLOGÍA**

Ciudad Universitaria, D.F., 24 de mayo de 2000

BIOL. ERNESTO SOTO GALERA
PRESENTE.

Por la presente me permito informar a usted que después de consultar con el Subcomité Académico del Instituto de Ecología, se acordó aceptar su propuesta de Jurado para la presentación de su examen de grado de Maestro en Ecología, integrado como sigue:

Presidente: Dra. María Esther G. Ruíz Santoyo
Secretario: Dra. Marisa Mazari Hiriart
Vocal: Dr. Luis Antonio Bojórquez Tapia
Suplente: Dr. Ricardo Barandela Alonso
Suplente: Dr. Valentino Sorani Dalbon

Atentamente,

Dr. Rodolfo Darzo Minjarez
Responsable de la Entidad

AGRADECIMIENTOS

A mi asesora Dr. Marisa Mazari y al Dr. Luis A. Bojórquez por la dirección y apoyo en la realización de la presente tesis.

A la Dra. Christina Siebe y al Dr. Manuel Maass por su asesoramiento y comprensión.

Al Instituto de Ecología de la UNAM por brindarme la posibilidad de desarrollarme académicamente.

Al Instituto Mexicano del Petróleo, en particular a la Dra. M. Esther Ruíz, Dra. Elba Ortiz y al Ing. M. Arturo Rodríguez por la comprensión y apoyo brindado.

Al Dr. Ricardo Barandela y Dr. Valentino Sorani por ayudarme a consolidar el trabajo de tesis.

Al Instituto de Geografía, en particular al Dr. José Luis Palacio y al Dr. M. Arturo Ortiz por haberme brindado las herramientas que en un tiempo me faltaron.

A la M. en C. Giselle Signoret por apoyarme en mi desarrollo académico.

Al Dr. Marcos Mazari por haberme explicado el subsuelo de la Cuenca de México.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT) por haberme otorgado la beca de posgrado que me permitió realizar los estudios de maestría.

A mis compañeros del Laboratorio de Ecología Química del Instituto de Ecología

A mis compañeros del Grupo de Análisis Geográfico Ambiental del IMP.

A todas las personas que han contribuido en este trabajo

Un agradecimiento especial a mi familia y a Silvia Angélica por su cariño.

INDICE

	PAG.
Resumen	i
Abstract	ii
1. Introducción	1
2. Zona de estudio	4
2.1. Ubicación geográfica	4
2.2. Descripción física	6
2.2.1. Geología	6
2.2.2. Sistema de acuíferos	7
2.2.3. Geomorfología	9
2.2.4. Sistemas de agua superficial	10
2.2.5. Desarrollo histórico de la Ciudad de México	13
3. Método	16
4. Resultados y discusión	19
4.1. Industria	20
4.2. Drenaje	22
4.3. Gasolineras	26
4.4. Depósitos de residuos sólidos	28
4.5. Depósitos de combustible	29
4.6. Pozos de extracción de agua	32
4.7. Zona urbanizada	34
4.8. Zonas de baja permeabilidad	36
4.9. Clasificación de entidades	38
4.10. Descripción de grupos de entidades	40
4.11. Entidades propensas a la contaminación	44
5. Conclusiones	48
5.2. Bibliografía	50

RESUMEN

El setenta por ciento del agua que se utiliza en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) para uso doméstico, industrial y agrícola proviene de los sistemas de acuíferos de la Cuenca de México, por lo que es importante conocer las fuentes de contaminación que pueden influir en la calidad del recurso. En el presente estudio se realiza un análisis espacial, a nivel de delegación y municipio, de las principales fuentes contaminantes del agua subterránea, con el objeto de identificar zonas propensas a la contaminación. Se tomaron como fuentes contaminantes la industria, los confinamientos de residuos sólidos, los depósitos de combustible, el sistema de drenaje, las gasolineras, los pozos de extracción y la zona urbanizada. La distribución de las fuentes contaminantes, aunada a las zonas geológicas principales que subyacen a la ciudad, permitió determinar que el centro de la ZMCM presentaba la mayor concentración de fuentes contaminantes, mientras que la mayor propensión a la contaminación para el sistema de acuíferos se encontró hacia el sur-poniente y norte de la ZMCM.

PALABRAS CLAVE. Zona Metropolitana Ciudad de México, Fuentes contaminantes, Agua subterránea, Análisis espacial.

ABSTRACT

Since seventy percent of the water for domestic, industrial and agricultural use in the Mexico City Metropolitan Area (MCMA) comes from the aquifer system in the Basin of Mexico, it is important to know the contaminant sources that can influence its water quality. A spatial analysis of the main groundwater contaminant sources was performed at a municipal scale, to identify areas prone to contamination. Industries, landfills, fuel storage facilities, drainage systems, gas stations, extraction wells and the urban zone were considered as contaminant sources.

Taking into account the distribution of contaminant sources and the main underlying geology, showed that while the center of the MCMA presented the larger concentration of contaminant sources, the higher risk of contamination for the aquifer system was located in the south-west and north of the MCMA.

KEYWORDS. Mexico City Metropolitan Area, Contaminant sources, Groundwater, Spatial analysis.

1. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento para uso doméstico e industrial en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). En el pasado, se le consideró como un recurso protegido naturalmente a las distintas fuentes contaminantes, sin embargo, en años recientes se han reportado problemas de contaminación en acuíferos en diversos países.

En particular, en Estados Unidos, Canadá y Europa, la contaminación de acuíferos por compuestos orgánicos ha sido estudiada debido a su persistencia y toxicidad (NRC, 1984; Pupp, 1985; Patrick *et al.*, 1987; Mackay y Cherry, 1989; Westrick *et al.*, 1990; Alley, 1993; Pankow y Cherry, 1996). En Alemania, Gran Bretaña, Italia y Holanda, a partir de la década de los ochenta esta contaminación es un área prioritaria desde el punto de vista ambiental (Fielding *et al.*, 1981; Trouwborst, 1981; Cavallaro *et al.*, 1985; Schwille, 1988; Rivett *et al.*, 1990).

De los diversos compuestos orgánicos sintéticos encontrados en agua subterránea, los más comunes son los disolventes industriales y los hidrocarburos aromáticos derivados del petróleo (Mackay *et al.*, 1985; Mackay y Cherry, 1989). Estos compuestos producen efectos adversos en la salud, como son depresión del sistema nervioso central, disfunción de hígado y riñón; además de que algunos de ellos son cancerígenos (Verschueren, 1983; Sittig, 1985; Sax y Lewis, 1989).

La ZMCM representa un estudio de caso por los indicios de contaminación por compuestos orgánicos en el agua subterránea y su alta densidad poblacional e industrial.

El suministro de agua de la ZMCM se ha visto afectado por la explotación de las fuentes de abastecimiento y el deterioro de la calidad del recurso (Durazo, 1996). En la ZMCM se utilizan en la actualidad $67 \text{ m}^3/\text{seg}$ de agua, con un déficit en relación con la demanda de $6 \text{ m}^3/\text{seg}$. De este caudal, alrededor del 70% ($47 \text{ m}^3/\text{seg}$) del agua usada proviene del sistema de acuíferos de la Cuenca de México (Ezcurra y Mazari-Hiriart, 1996; Merino, en prensa).

Las principales fuentes de contaminación de agua subterránea en la ZMCM son la industria, los confinamientos de residuos sólidos, los depósitos de combustible, el drenaje primario, el drenaje profundo, las gasolineras, la zona urbanizada y los pozos de extracción (Mazari y Mackay, 1993; Consejo Nacional de Investigación, 1995; Ezcurra y Mazari-Hiriart, 1996; Durazo, 1996; Pick y Butler, 1997). Estos últimos, juegan un papel importante en el flujo local de agua subterránea, y en el caso de pozos cancelados y no sellados representan vías directas para la introducción de contaminantes al acuífero (Mazari y Mackay, 1993).

El estudio integral de la contaminación de agua subterránea y los planes de manejo del recurso se hace difícil debido a que la información que se ha generado de las fuentes

contaminantes de agua subterránea en la ZMCM, es escasa o de difícil acceso y mucha de ella presenta deficiencias en sus características geográficas.

El objetivo de esta tesis es el de identificar las entidades políticas propensas a la contaminación de agua subterránea por compuestos orgánicos en la ZMCM, a través del análisis de la distribución espacial de las principales fuentes contaminantes, utilizando métodos de análisis espacial y de clasificación numérica.

2. ZONA DE ESTUDIO

2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La Ciudad de México se encuentra en la parte baja de una cuenca hidrológica, originalmente cerrada y abierta artificialmente en la época de la colonia entre los años 1607 y 1609, forma parte del Eje Volcánico Transversal, que atraviesa la República Mexicana desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México (Mooser, 1987).

La Cuenca de México tiene una forma elíptica, su eje mayor que va desde Xochimilco, en el suroeste, hasta Pachuca en el norte, mide aproximadamente 110 km y su eje menor desde la Sierra de Las Cruces, en el oeste, hasta la Sierra Nevada, en el este, mide aproximadamente 80 km. Abarca el Distrito Federal y parte de los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla. Esta cuenca tiene una área de 9,560 km² (Bassols, 1966), con una elevación entre 2,236 y 2,250 msnm, está formada por la subcuenca de Zumpango, al norte; la subcuenca de la Zona Metropolitana, al centro y al poniente; la subcuenca de Texcoco, al centro-oriente y la subcuenca de Chalco-Xochimilco al sur (Mazari *et al*, 1992).

La ZMCM es una de las grandes megalópolis de la Tierra y la concentración económico-demográfica más importante de México, está formada por 43 entidades políticas, 16 delegaciones pertenecientes al Distrito Federal y 27 municipios del Estado de México (INEGI, 1993; Figura 1). El área urbana ha crecido de 30 km² en 1910, a 1,160 km² en 1990 (IG, 1990), con escasa planeación urbana. En esta zona se produce el 45% del producto interno bruto nacional y en 1995 albergaba el 18.3% de la población del país y poco más de la cuarta parte de la población urbana (INEGI, 1995).

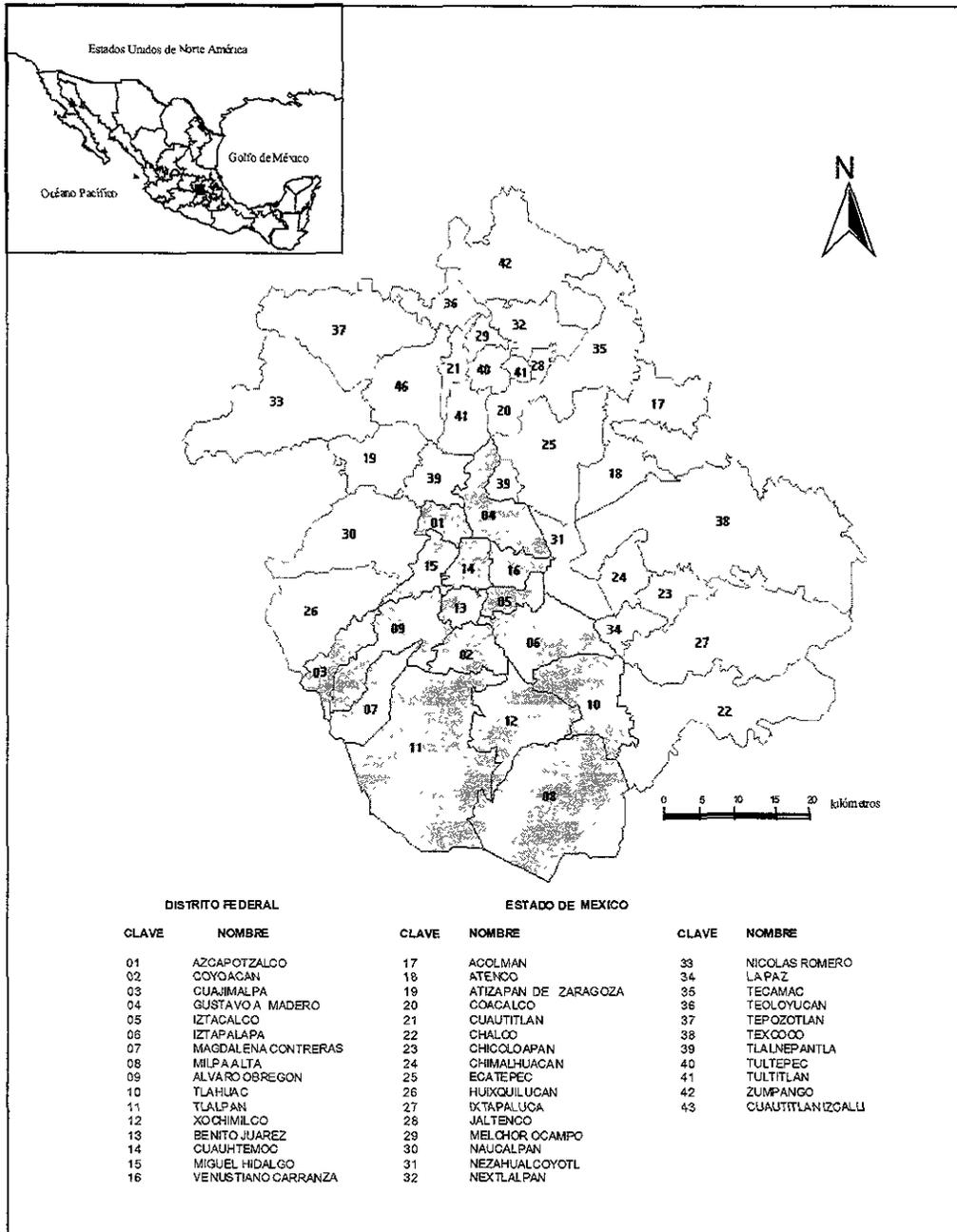


Figura 1. Delegaciones y municipios de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (INEGI, 1993).

2.2. DESCRIPCIÓN FÍSICA

2.2.1. GEOLOGÍA

En la ZMCM se distinguen tres zonas geológicas: la lacustre, la de transición y la de lomas (DDF, 1988). La zona lacustre se caracteriza por espesores de más de 30 m de arcillas blandas de alta compresibilidad; está constituida por estratos arcillosos alternados con suelos de desecación; comprende también capas de ceniza y pomez. La zona de transición forma una franja que divide los suelos lacustres de las partes bajas de las lomas; consiste de suelos y arenas aluviales con algunas capas de gravas fluviales en la desembocadura de las barrancas; el conjunto contiene intercalaciones de sedimentos de playas y turbas a orillas del lago. Finalmente la zona de lomas está constituida por la Formación Tarango; consiste principalmente de tobas, depósitos fluviales y flujos piroclásticos (lahares calientes y corrientes de lodo), originados en las erupciones de la Sierra de las Cruces. Esta masa volcánica limita la Cuenca al poniente. Al norte se encuentra la Sierra de Guadalupe, formada por conos y domos volcánicos antiguos. Al sur se eleva la Sierra del Chichinautzin, compuesta de fenobasaltos y cenizas. Y al oriente se encuentra la Sierra Nevada con sus extensos abanicos volcánicos (Formación Tarango). La conductividad hidráulica en la zona lacustre es de 10^{-8} a 10^{-10} cm/s, en contraste con las zonas de transición y lomas cuya conductividad hidráulica promedio es entre 10^{-3} y 10^{-5} cm/s (Marsal y Mazari, 1969).

2.2.2. SISTEMA DE ACUÍFEROS

El sistema de acuíferos de la Cuenca de México está formado por tres acuíferos: el acuífero superior, el acuífero medio y el acuífero profundo (Figura 2), están separados por dos elementos muy poco permeables, los depósitos lacustres del Plioceno y la formación del Balsas y las margas y lutitas del Cretácico superior (Mooser, 1990).

Acuífero superior

Este acuífero está confinado en su parte superior por las arcillas lacustres superficiales (acuitardo); en su parte inferior, por los depósitos lacustres del Plioceno inferior.

Debido a la litología de sus elementos, el acuífero superior puede dividirse en: acuífero superior somero y acuífero superior profundo.

El acuífero superior somero está formado por elementos granulares (rellenos aluviales y formación de Tarango) y por cuerpos lávicos: basaltos del Pleistoceno Reciente, altamente permeables, y cuerpos volcánicos basáltico-andesíticos, medianamente permeables.

El acuífero superior profundo está representado, primero, por el cuerpo de clastos cementados, que se caracterizan por su permeabilidad secundaria debido a su fracturamiento por tectonismo y, segundo, por los cuerpos de las sierras pliocénicas poco permeables como la sierra de Guadalupe.

Acuífero medio

El acuífero medio está formado por el conjunto de vulcanitas del Mioceno y Oligoceno. La fuerte presión a la cual están sometidas estas formaciones, las hace esencialmente impermeables; sin embargo, su falta de permeabilidad primaria se compensa por la permeabilidad secundaria, producida por el tectonismo que las afecta.

El acuífero medio está confinado en la parte superior por las arcillas lacustres del Plioceno y en la parte inferior por los sedimentos poco permeables de la formación del Balsas y las margas y lutitas de la formación Mezcala.

Acuífero profundo

Este acuífero está formado por calizas masivas del basamento sedimentario marino, fracturadas por cabalgaduras y fallamientos tafrogénicos de principios del Terciario. Estas fracturas indujeron la creación de carsticidad, una condición óptima de permeabilidad secundaria. El confinante superior lo forman las lutitas, margas y areniscas de la formación Mezcala y los depósitos poco permeables de la formación Balsas.

El sistema de acuíferos que se explota, para el abastecimiento de agua a la ZMCM, forma parte del acuífero superior y los pozos de extracción se localizan principalmente entre los 80 y los 300 m de profundidad (Lesser y Cortés, 1998).

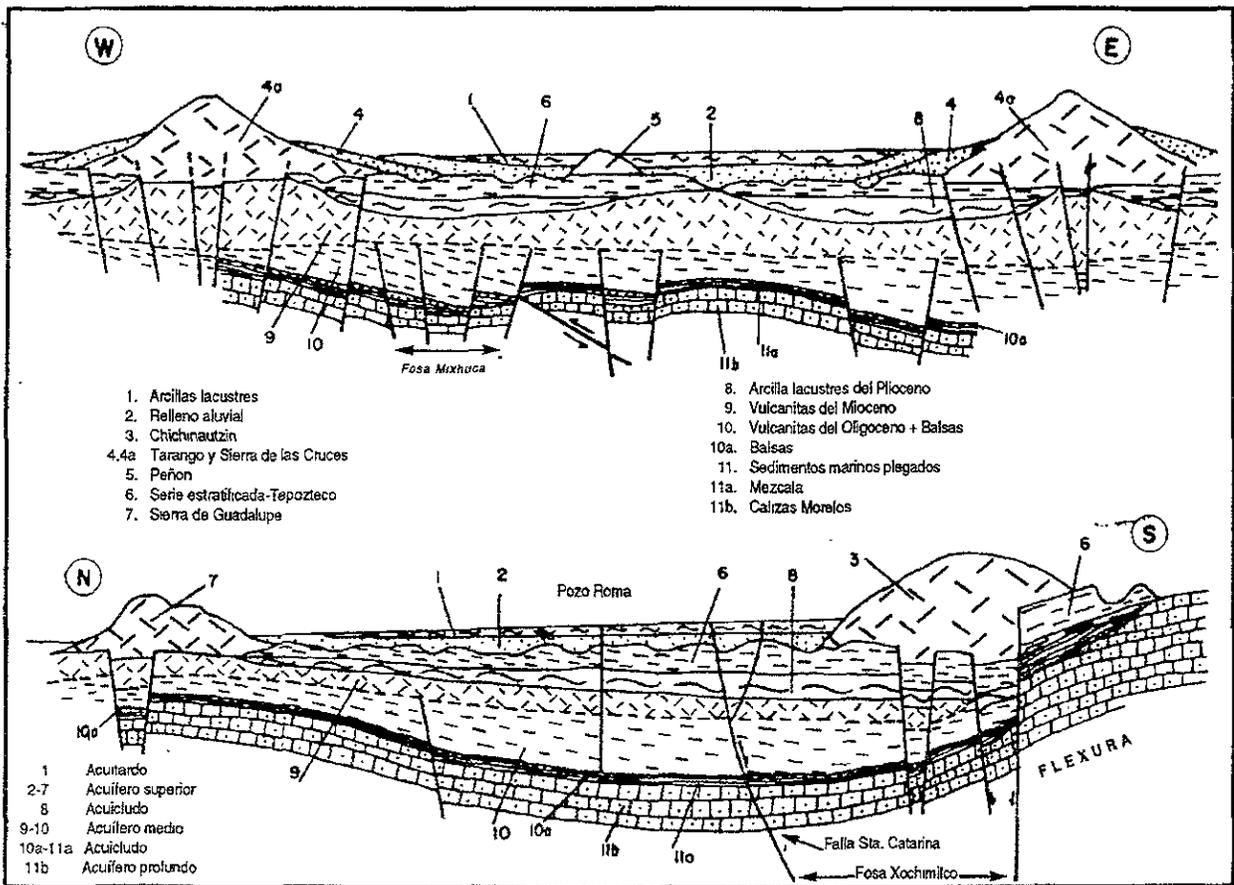


Figura 2. Modelo del sistema de acuíferos de la ZMCM (Mooser, 1990).

2.2.3. GEOMORFOLOGÍA

La Cuenca de México tiene características montañosas tanto por sus límites como por su morfología. Esta cuenca tiene como vecinas a las cuencas de Puebla, Toluca y Cuernavaca.

La Cuenca de México está subdividida en la época actual en pequeñas y grandes subcuencas. La porción central de la Cuenca de México sólo está separada de la subcuenca del extremo sur (Xochimilco) por un levantamiento oriente-poniente (Sierra de Santa Catarina), paralelo al levantamiento principal de la porción sur, limítrofe de la cuenca (Sierra del Chichinautzin).

La gran Cuenca de México tiene límites al oriente, poniente y al sur, grandes levantamientos con orientaciones paralelas (oriente-poniente) y meridianas (norte-sur), por un lado la Sierra Nevada y de las Cruces y por otro lado la Sierra del Chichinautzin, respectivamente.

Las unidades morfoestructurales más representativas de la cuenca son cinco: planicies bajas, planicies elevadas, talud transicional, estructuras tectovolcánicas principales y elevaciones volcánicas menores (López, 1987).

2.2.4 SISTEMAS DE AGUA SUPERFICIAL

La Cuenca de México tiene varios lagos someros, de los cuales el Lago de Texcoco situado en el este de la ZMCM, es el de mayor tamaño, le sigue en importancia el lago de Zumpango, en el noreste, en tanto que el Lago de Chalco, al sureste, desapareció a principios de este siglo. Otros cuerpos de agua de importancia son los canales de Xochimilco. Hacia el noreste de la cuenca se ubica una área de numerosas elevaciones volcánicas y con depresiones que ocupan algunas lagunas someras como las de Apan, Tochac y Tecocomulco, las cuales desaparecen en estiaje (DDF, 1982).

Desde el punto de vista hidrográfico, la Cuenca de México se puede dividir en once zonas (Figura 3):

Zona I. Comprende las cuencas de los ríos que descienden de la Sierra del Chichinautzin, la cual presenta formaciones basálticas de gran permeabilidad. Los caudales de los ríos San Gregorio, San Lucas, Santiago y San Buenaventura.

Zonas II y III. Incluye gran parte de la zona urbana de la Ciudad de México y los ríos que bajan hacia ella desde las montañas del poniente.

Zona IV. Abarca las cuencas de los ríos Tepozotlán y Cuautitlán, que se originan en el noroeste de la cuenca.

Zonas V y VI. Corresponden a las cuencas de los ríos de las Avenidas de Pachuca y San Juan Teotihuacán, respectivamente.

Zona VII. Incluye los ríos que desembocan en el Lago de Texcoco por el oriente.

Zona VIII. Esta zona también se encuentra en el oriente, comprende los ríos que se sitúan entre el San Francisco y el Milpa Alta.

Zonas IX, X y XI. Se extienden desde la cuenca del río Tizar hasta las corrientes alimentadoras del río Tecocomulco.

En conjunto, las corrientes superficiales de la Cuenca de México tienen un caudal medio de $19 \text{ m}^3/\text{s}$, que representan el 9% de la precipitación pluvial media anual. De ello se aprovechan solamente $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ (Consejo Nacional de Investigación, 1995).

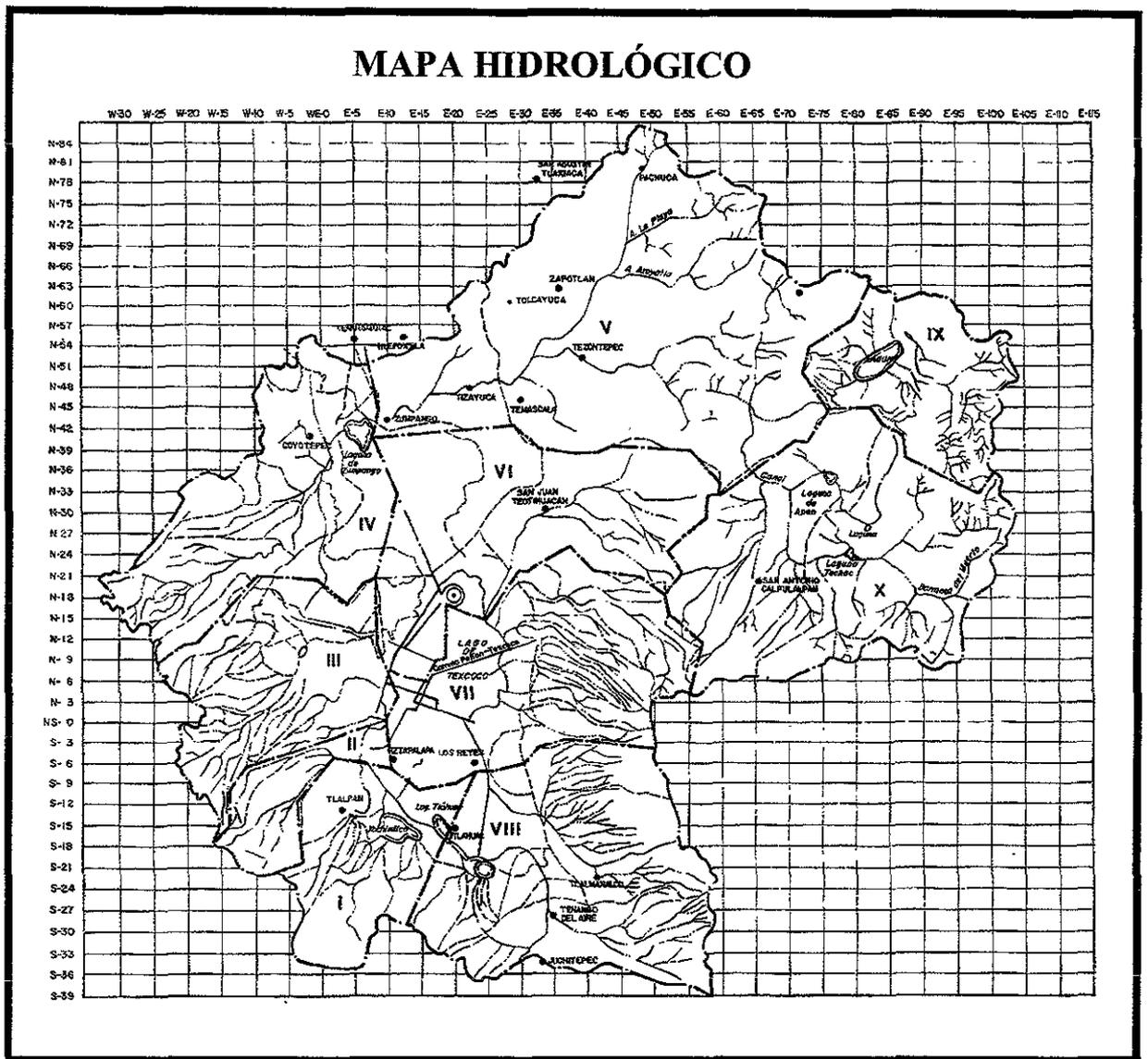


Figura 3. Mapa hidrológico de la Cuenca de México (Consejo Nacional de Investigación, 1995).

2.2.5. DESARROLLO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Los primeros pobladores que se asentaron en la Cuenca, lo hicieron 1800 años aC en zonas como Tlapoyaca (cerca del lago de Chalco), y con el transcurso del tiempo fueron floreciendo grandes culturas, como la teotihuacana, la cual en el año de 650 aC alcanzó los 150,000 habitantes. En 1325 dC los aztecas llegan a la Cuenca de México dando origen a la gran cultura mexicana y para finales del siglo XV, en la mayor ciudad de los mexicas (Tenochtitlán) vivían unas 200,000 personas. En esta época se estimaba que la Cuenca de México tenía una población de un millón y medio de habitantes, lo cual hacía esta zona una de las áreas urbanas más grande y más densamente poblada del mundo (Serra-Puche, 1990; Ezcurra, 1992).

Con la llegada de los españoles a Tenochtitlán en 1519 y meses después la caída de la cultura azteca, la cuenca se fue transformando desarrollándose dentro de ella la Ciudad de México.

En épocas recientes el crecimiento de la Ciudad de México se puede dividir en cuatro etapas. Durante la primera etapa, que va del año de 1890 a 1930, la Ciudad de México comprendía las actuales delegaciones de Cuauhtémoc, Benito Juárez, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza, se observaba un principio de urbanización en las delegaciones Coyoacán y Azcapotzalco. La segunda etapa de 1930 a 1950 comprende un aumento en la tasa de crecimiento de la población y una expansión hacia la periferia de la ciudad. La tercera etapa comprende de 1950 a 1980, hay una expansión territorial de la Ciudad de México hacia municipios suburbanos del Estado de México, como es el caso de Tlalnepantla, Ecatepec y Naucalpan, entre otros.

La última etapa de 1980 a 1990 se caracteriza por la disminución del ritmo de crecimiento poblacional en el Distrito Federal y altas tasas de crecimiento en los municipios conurbados (Garza y Damián, 1991).

De acuerdo con INEGI (1995) la población de la ZMCM en 1995 era de alrededor de 16.6 millones de habitantes, correspondiente al 18.3% de la población del país y poco más de la cuarta parte de la población urbana (Tabla 1). En los últimos veinticinco años se ha registrado una tasa de crecimiento poblacional promedio anual de 2.5%. Las delegaciones y municipios de la ZMCM que registraron altas tasas de crecimiento fueron Chimalhuacán, Coacalco y Atizapan de Zaragoza, con valores promedio superiores al 10%, mientras delegaciones como Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Venustiano Carranza, Benito Juárez, Azcapotzalco e Iztacala, tienen tasas negativas que reflejan una disminución en su población.

La población de los 27 municipios conurbados de la ZMCM representaban el 49% del total de la población, así el Distrito Federal contaba con el 51 % de la población total, las delegaciones y municipios con mayor población eran Iztapalapa con el 10.2% del total de la ZMCM, Ecatepec con 8.7%, Gustavo A. Madero con el 7.5 % y el municipio de Nezahualcóyotl con 7.4% (INEGI, 1995).

Tabla 1. Población en cada entidad de la ZMCM (INEGI, 1995).

ENTIDAD	POBLACION (hab)	SUPERFICIE (km ²)	DENSIDAD (hab/km ²)
DISTRITO FEDERAL	8028581	1499.10	5356
DELEGACIONES			
AZCAPOTZALCO	455042	34.50	13190
COYOACAN	653407	59.20	11037
CUAJIMALPA	136643	72.90	1874
GUSTAVO A. MADERO	1255003	91.50	13716
IZTACALCO	418825	21.80	19212
IZTAPALAPA	1696418	124.50	13626
MAGDALENA CONTRERAS	211771	62.20	3405
MILPA ALTA	81078	268.60	302
ALVARO OBREGON	676440	93.70	7219
TLAHUAC	255890	88.40	2895
TLALPAN	552273	309.70	1783
XOCHIMILCO	332222	134.60	2468
BENITO JUAREZ	369848	28.00	13209
CUAUHTEMOC	539482	32.00	16859
MIGUEL HIDALGO	363800	46.80	7774
VENUSTIANO CARRANZA	485481	30.70	15814
ESTADO DE MEXICO	8182679	3219.9	2541
MUNICIPIOS			
ACOLMAN	54369	52.50	1036
ATENCO	27937	139.70	200
ATIZAPAN DE ZARAGOZA	427338	75.00	5698
COACALCO	204610	45.00	4547
CUAUTITLAN	57377	75.00	765
CHALCO	175430	273.60	641
CHICOLOAPAN	71347	63.70	1120
CHIMALHUACAN	411890	33.70	12222
ECATEPEC	1456438	126.20	11541
HUIXQUILUCAN	168244	109.90	1531
IXTAPALUCA	187593	206.10	910
JALTENCO	26244	38.70	678
MELCHOR OCAMPO	33398	32.50	1028
NAUCALPAN	839430	154.90	5419
NEZAHUALCOYOTL	1233680	62.00	19898
NEXTLALPAN	15047	50.00	301
NICOLAS ROMERO	236985	206.10	1150
LA PAZ	178574	36.90	4839
TECAMAC	148349	137.40	1080
TEOLOYUCAN	54442	35.00	1555
TEPOTZOTLAN	54358	241.10	225
TEXCOCO	173081	503.50	344
TLALNEPANTLA	713180	82.50	8645
TULTEPEC	75817	22.50	3370
TULTITLAN	361350	96.20	3756
ZUMPANGO	91620	208.60	439
CUAUTITLAN IZCALLI	417645	111.60	3742
CHALCO SOLIDARIDAD	286906	MUNICIPIO NUEVO	

3. MÉTODO

La información de cada una de las fuentes contaminantes, industria, confinamiento de residuos sólidos, grandes depósitos de combustible, drenaje primario, drenaje profundo, gasolineras, zona urbanizada y pozos de extracción, se recopiló de distintos informes gubernamentales (DGCOH, 1993 y 1996; INEGI, 1994; Riosvelasco, 1994; IMP, 1997; PEMEX, 1997). Esta información se clasificó y analizó, para poder incorporarla a un Sistema de Información Geográfica.

La geología, los límites delegacionales y los municipales se obtuvieron de las siguientes fuentes bibliográficas y cartográficas: Mooser (1974), Marsal y Mazari (1969), INEGI (1994) y DDF (1988). La carta del área urbanizada se generó a partir de la interpretación de dos imágenes LANDSAT TM de la Ciudad de México de 1997 (Path/Row 026/046 y 026/047), por medio de un compuesto en falso color (bandas 4, 3 y 2).

Los análisis espaciales se llevaron a cabo mediante un SIG con los programas ARC-INFO v.7.1.1 y ARC-VIEW v.3.0 (ESRI, 1997).

Las capas de fuentes de contaminación y subsuelo se sobrepusieron a la carta de división política de la ZMCM. A través de operaciones cartográficas, dependiendo de la variable, se obtuvo la frecuencia, el porcentaje, o la longitud en cada entidad. Las entidades se clasificaron en cuatro clases, que se obtuvieron de la proporción de una variable en cada entidad, en relación con el valor máximo de la misma, así

las clases fueron, muy baja (de 0 a 25%), baja (de 26 a 50%), alta (de 51 a 75%) y muy alta (de 76 a 100%), así se pudo obtener la presencia de cada variable por entidad.

Para estimar el grado de independencia de las fuentes de contaminación y el porcentaje de área ocupada por subsuelo arcilloso, se calculó el coeficiente de correlación (Sokal y Rohlf, 1995) entre pares de variables.

Se estimó la importancia de cada variable en cada entidad política a partir de la desviación normalizada (d.n.) con respecto a su promedio (Sokal y Rohlf, 1995). Así, se obtuvieron cuatro categorías de importancia: Muy baja ($d.n. < -1\sigma$), baja ($-1\sigma \leq d.n. \leq \mu$), alta ($\mu < d.n. \leq 1\sigma$) y muy alta ($d.n. > 1\sigma$). La importancia de cada variable se transfirió al SIG, mediante la creación de capas nominales.

Finalmente, las entidades políticas se clasificaron de acuerdo con la importancia de las fuentes de contaminación y el porcentaje de área ocupada por subsuelo arcilloso (zona lacustre), mediante técnicas de clasificación numérica adaptadas al SIG. Se siguió el método de clasificación politético divisivo (Digby y Kempton, 1987; Noy-Meir, 1973; Pielou, 1984), el cual permite ir agrupando los sitios (entidades) de acuerdo a sus características (fuentes contaminantes) a través de un análisis multi dimensional, para lo cual se normalizó la matriz de datos originales $n \times l$, donde n son las entidades y l son los factores de contaminación y arcillas (Tabla 3).

En el análisis politético divisivo se aplicaron siete análisis de componentes principales con ayuda del programa computacional ORDEN (Ezcurra,1992). Así se pudo agrupar las entidades con características similares.

La propensión a la contaminación de agua subterránea se obtuvo usando una tabla de decisión (Tabla 2).

Tabla 2. Propensión a la contaminación de agua subterránea de acuerdo con fuentes de contaminación y subsuelo arcilloso en la ZMCM; MB, propensión muy baja; B, propensión baja; A, propensión alta y MA, propensión muy alta.

Importancia del subsuelo arcilloso	<u>Importancia de fuentes de contaminación</u>			
	Muy Baja	Baja	Alta	Muy Alta
Muy Baja	A	A	MA	MA
Baja	B	B	A	MA
Alta	MB	B	A	A
Muy Alta	MB	MB	B	B

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo al resultado de la sobreposición de las capas de fuentes de contaminación y subsuelo, a la carta de división política de la ZMCM, se obtuvo la Tabla 3 que muestra la presencia de las distintas fuentes contaminantes y el porcentaje de suelo arcilloso en cada entidad.

Tabla 3. Fuentes contaminantes

Entidad	Fuentes contaminantes y subsuelo								
	Industrias (#)	Drenaje primario (km)	Drenaje profundo (km)	Depósitos de residuos (#)	Depósitos de combustibles (#)	Zona urbanizada (%) ^a	Gasolineras (#)	Pozos (#)	Arcillas (%) ^a
1	1268	66.1	4.7	0	1	100	10	47	93
2	580	71.8	6.5	0	0	89	20	114	47
3	74	0.0	0.0	0	0	15	3	0	0
4	1891	167.6	15.3	0	0	85	20	18	53
5	1246	70.6	7.3	0	1	100	10	23	100
6	2208	88.3	17.0	2	0	92	21	76	48
7	70	5.1	0.0	0	0	18	1	1	0
8	50	0.0	0.0	1	0	1	2	22	0
9	527	62.1	8.0	2	1	43	16	53	0
10	312	0.0	0.0	1	0	28	1	47	59
11	444	29.9	0.0	1	0	20	9	103	3
12	155	15.2	0.6	0	0	25	3	100	28
13	1457	69.2	2.8	0	0	100	31	33	88
14	3880	99.1	10.7	0	0	99	50	46	99
15	971	93.7	11.9	0	0	52	26	51	24
16	1419	82.3	7.3	0	0	100	18	18	99
17	32	0.0	0.0	0	0	5	1	17	7
18	8	2.4	0.0	0	0	2	0	23	97
19	280	0.0	0.9	1	0	31	3	3	0
20	79	0.0	0.0	1	0	41	3	4	38
21	90	0.0	0.0	0	0	26	5	0	58
22	163	0.0	0.0	0	0	26	5	67	17
23	61	0.0	0.0	0	0	1	0	13	16
24	172	0.0	0.0	1	0	29	2	41	64
25	1364	14.4	0.0	1	0	62	13	106	53
26	22	0.9	0.0	1	0	8	2	0	0
27	120	0.0	0.0	0	0	6	2	87	2
28	0	0.0	0.0	0	0	8	0	0	100
29	10	0.0	0.0	0	0	14	0	0	51
30	1076	47.3	3.1	1	0	20	13	10	0
31	1502	5.9	0.0	3	0	73	9	23	98
32	6	0.0	0.0	0	0	2	0	0	91
33	95	0.0	0.0	1	0	4	3	0	0
34	206	0.0	0.0	1	0	19	2	45	17
35	101	0.0	0.0	1	0	9	2	8	19
36	7	0.0	0.0	0	0	0	2	0	54
37	43	0.0	0.0	0	0	1	3	0	0
38	134	1.7	0.0	0	0	4	3	263	24
39	1181	36.4	22.3	1	1	59	18	8	19
40	27	0.0	0.0	0	0	12	0	1	86
41	182	0.0	1.6	1	0	33	2	2	18
42	40	0.0	0.0	0	0	1	0	0	26
43	250	0.0	0.6	1	0	28	5	0	0

^aPorcentaje del área total de cada entidad

4.1. Industria

La Ciudad de México tuvo una acelerada industrialización a partir de 1940, en una primera etapa (1940-1970), las industrias se asentaron principalmente en la zona norte del Distrito Federal y una minoría se encontraban en los municipios aledaños, mientras que en la segunda etapa (1970-1994), el número de industrias en los municipios conurbados de la ZMCM crecen a una tasa elevada, al contrario el número de industrias en el Distrito Federal de 1970 a 1989 decrece, volviendo a ascender a partir de 1990 (Schteingart, 1991; INEGI, 1994).

En la ZMCM se localizaron 23,803 industrias que utilizan compuestos orgánicos en algunos de sus procesos, las cuales se distribuyen principalmente en las delegaciones del norte del Distrito Federal y en los municipios colindantes.

La entidad con el mayor número de industrias es la delegación Cuauhtémoc, le siguen las delegaciones Iztapalapa y G.A. Madero. En tanto las delegaciones y municipios del sur, norte y este del área metropolitana presentan menos industrias. El único municipio en el que no se registró este tipo de industria fue Jaltenco (Figura 4).

El mayor número de industrias se encuentra en las entidades centrales de la ZMCM, pero éstas son pequeñas industrias, principalmente dedicadas a la producción textil, impresión y producción de instrumentos metálicos, en contraste con la zona noreste de la ZMCM donde se ubican grandes industrias que producen sustancias químicas, maquinarias y equipo (INEGI, 1994; Pick y Butler, 1997).

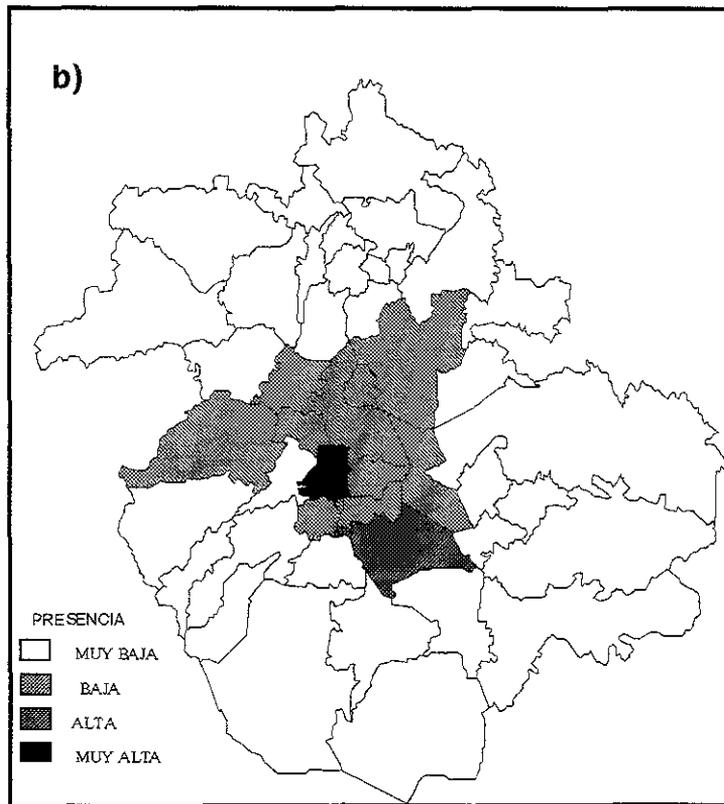
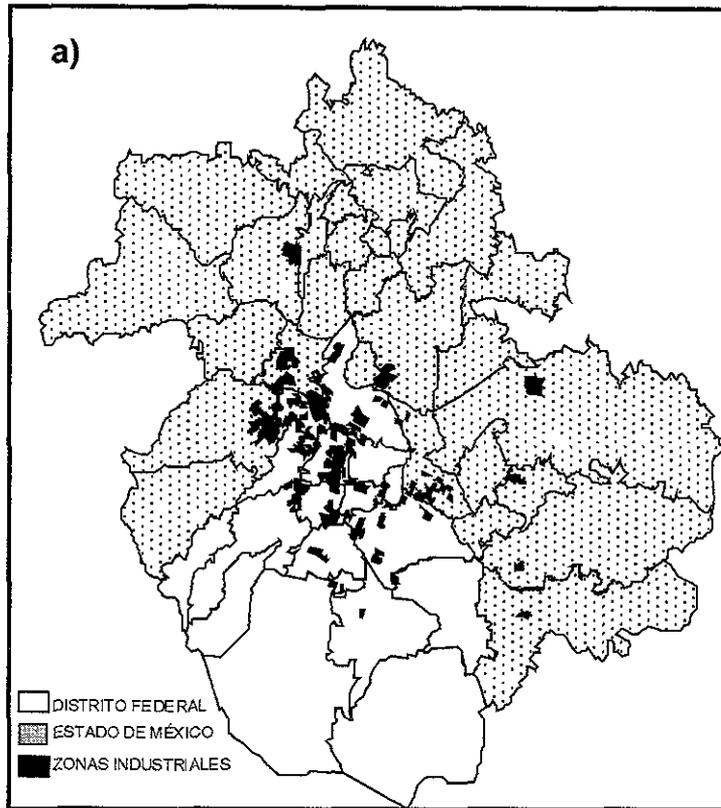


Figura 4. Distribución espacial (a) y presencia por entidad (b) de la industria en la ZMCM.

4.2 Drenaje

El drenaje primario en la ZMCM corre a lo largo de 1,030 km y el drenaje profundo cuenta con 121 km. La mayor parte se localiza en el Distrito Federal, siendo escaso en los municipios conurbados.

La red primaria de drenaje se encuentra distribuida principalmente en el norte del Distrito Federal y los municipios de Tlalnepantla y Naucalpan. La delegación con mayor longitud de red primaria es la delegación G.A. Madero, con 168 km, en la que se unen, además, varios de los sistemas de drenaje provenientes de diferentes áreas de la ciudad (Figura 5).

En lo que se refiere al drenaje profundo, el municipio de Tlalnepantla presenta 22 km, mientras que las delegaciones Iztapalapa, G. A. Madero y Miguel Hidalgo cuentan con 17, 15 y 12 km respectivamente, que son las entidades con mayor extensión de drenaje profundo (Figura 6).

El drenaje de la ZMCM transporta el agua residual de zonas habitacionales, de servicio e industriales, por lo que se mezclan una gran variedad de contaminantes. Se estima que la ZMCM produce 44 m³/s de aguas residuales y que más del 90% de los desechos líquidos industriales son descargados al drenaje sin previo tratamiento.

En la zona central de la ZMCM, el drenaje profundo está construido principalmente en zona de arcillas, aunque sus ramificaciones profundas se han excavado en el acuífero;

a su salida de la cuenca hacia al norte, los colectores que lo conforman cruzan la zona de transición. El subsistema de drenaje profundo se construyó para evitar inundaciones; sin embargo, la necesidad de reparaciones anuales, durante el estiaje, sugiere la posibilidad de infiltración del agua transportada hacia el área subyacente a los colectores del drenaje profundo, pero no se ha evaluado el volumen de pérdida.

Lo anterior, aunado a las condiciones deficientes de las tuberías del sistema de drenaje, ya sea por una instalación incorrecta, por deterioro o rupturas, dan lugar a fugas de agua residual hacia el suelo y se convierten en una fuente potencial de contaminación de agua subterránea. Esta situación es más seria en el caso del drenaje profundo, debido a que se encuentra a mayor profundidad y por lo tanto más cerca del acuífero, se han detectado ciertos daños en la red lo que sugiere infiltraciones a sus áreas adyacentes (DGCOH, 1996; Consejo Nacional de Investigación, 1995).

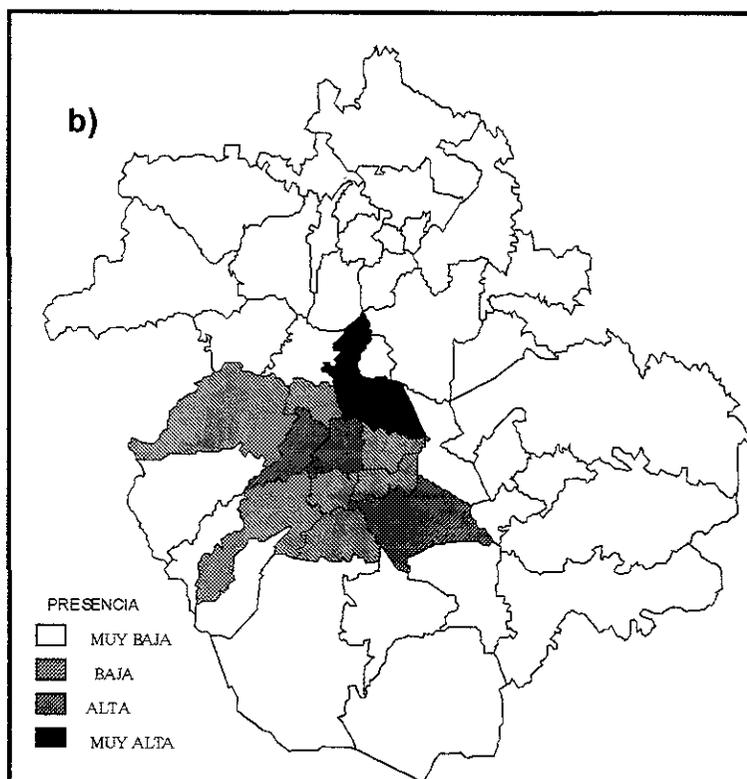
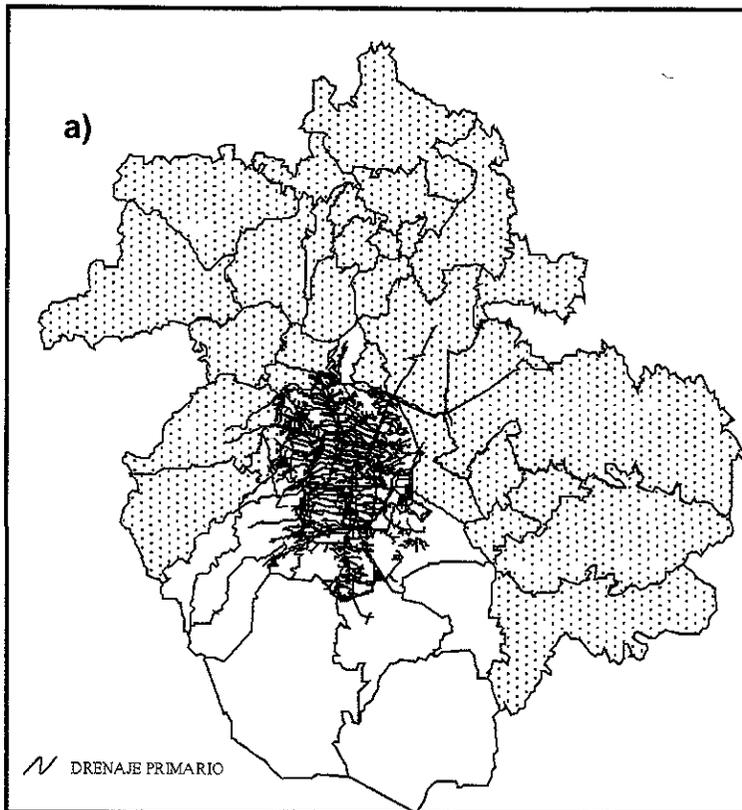


Figura 5. Distribución espacial (a) y presencia por entidad (b) del drenaje primario de la ZMCM.

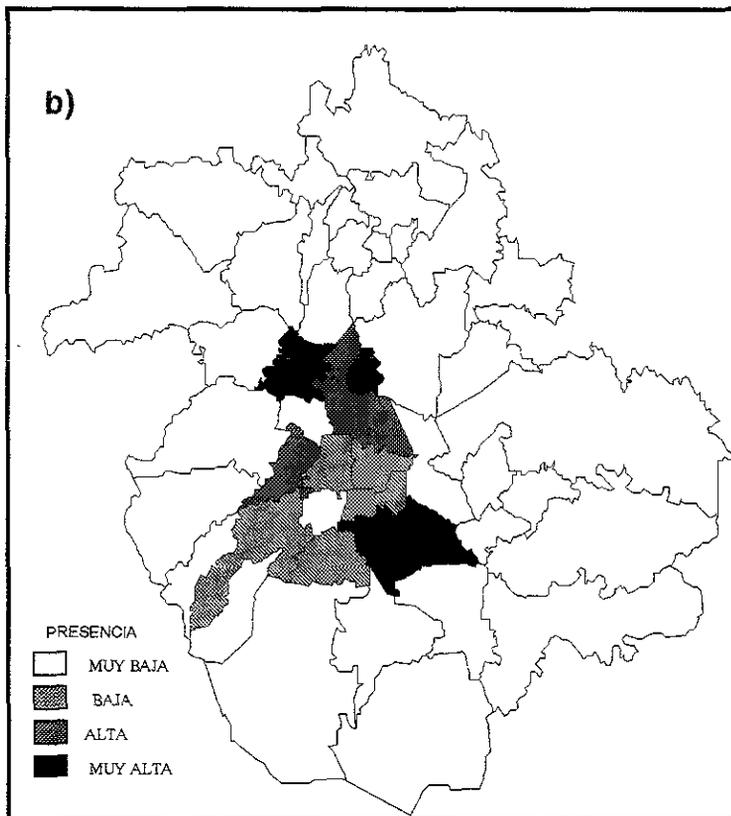
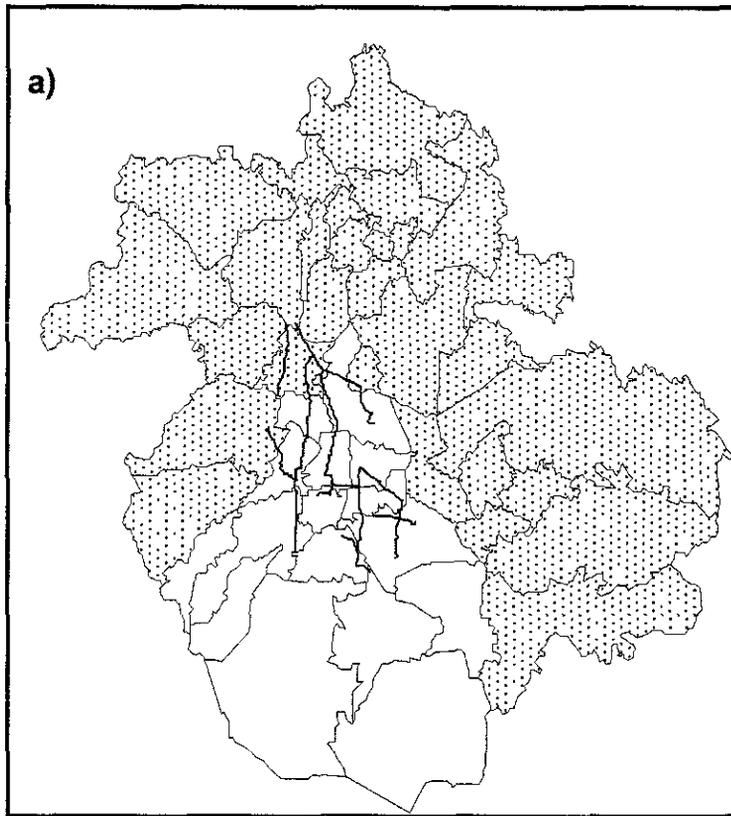


Figura 6. Distribución espacial (a) y presencia por entidad (b) del drenaje profundo de la ZMCM.

4.3 Gasolineras

En la ZMCM existen 339 gasolineras de las cuales el 71% se encuentran en el centro del Distrito Federal. La delegación Cuauhtémoc es la entidad con mayor número de gasolineras con 50, seguida por Benito Juárez con 31 y Miguel Hidalgo con 26 (Figura 7).

En las gasolineras la corrosión de antiguos tanques de almacenamiento aunada al movimiento del terreno, tanto por hundimiento como por sismos, fueron, durante largo tiempo, la causa principal de las rupturas en las tuberías de interconexión y en los tanques. En algunos casos se identificaron plumas contaminantes que cubrían diámetros de 10 a 50 m alrededor del origen (Consejo Nacional de Investigación, 1995).

A partir de 1990 se empezaron a monitorear gasolineras, detectándose fugas en la mitad de las estaciones de servicio. Desde entonces, se inició un programa de modernización de gasolineras con la consiguiente disminución del potencial contaminante. Es pertinente mencionar que en algunos de estos sitios también se utilizan una gran variedad de aceites y disolventes para el mantenimiento y limpieza de los automóviles, parte de los cuales se derraman al suelo y se descargan al drenaje.

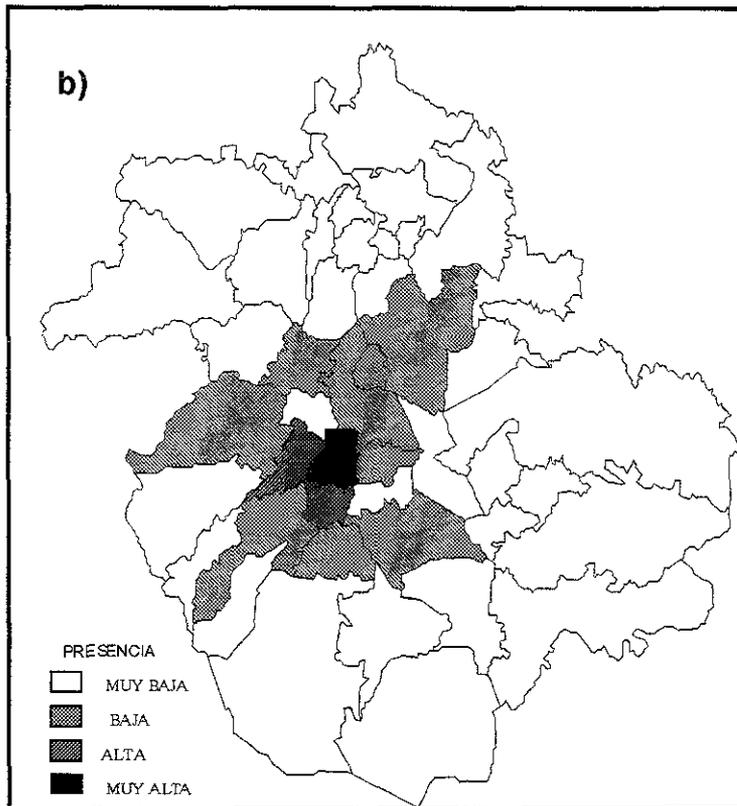
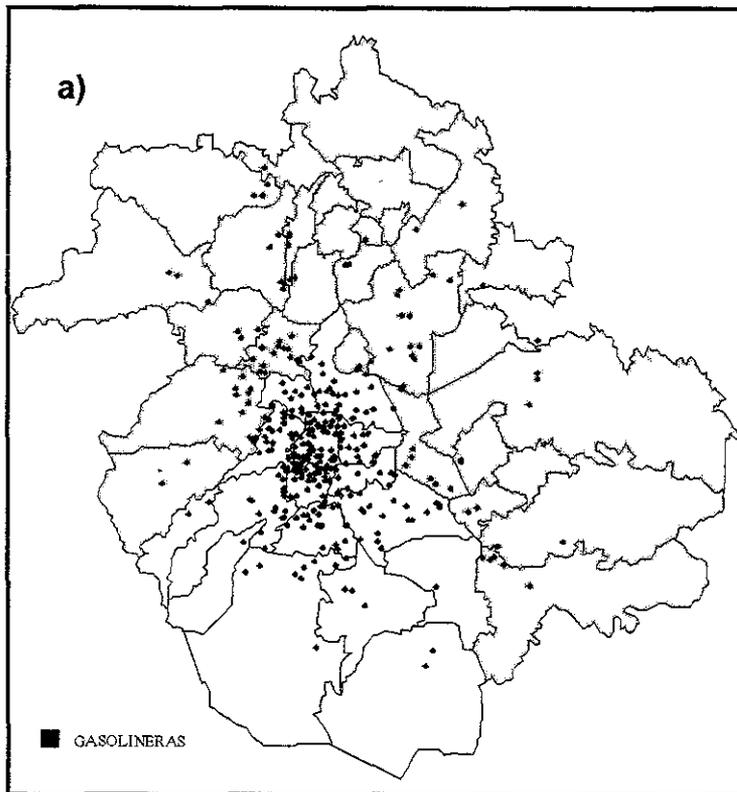


Figura 7. Distribución espacial y presencia por entidad (b) de las gasolineras de la ZMCM.

4.4 Depósitos de residuos sólidos

En la ZMCM se encuentran localizados 22 grandes depósitos de residuos sólidos, estos se localizan principalmente en la periferia del Distrito Federal. Actualmente la disposición de los desechos sólidos se lleva a cabo en tres sitios: Bordo Poniente (Nezahualcóyotl), donde se recibe el 40% de los desechos generados en la Ciudad de México; Prados de la Montaña (Alvaro Obregón); y el tiradero de Santa Catarina (La Paz) (Figura 8). Si bien, algunos de los confinamientos en el D.F. están clausurados, Riosvelasco (1994) reporta que algunos de estos operan clandestinamente.

En la ZMCM el volumen de residuos sólidos asciende a 18,000 ton/día y se calcula que para 2000 se producirá 27,000 ton/día, de las cuales el 48% corresponderá al D.F. y el resto a los municipios conurbados del Estado de México.

La generación de desechos sólidos se ha incrementado notablemente desde mediados del presente siglo, como resultado del crecimiento urbano-industrial; es entonces cuando surgen los grandes tiraderos a cielo abierto, al oriente y poniente del Distrito Federal, convirtiéndose en fuentes de contaminación y proliferación de fauna nociva. De estos tiraderos el más importante fue el de Santa Cruz Meyehualco que inició operaciones en 1948 y funcionó por más de 30 años (Riosvelasco, 1989).

La mayoría de los confinamientos de la ZMCM no cuentan con las características de ingeniería requerida para su instalación como rellenos sanitarios, evidencia de ello es que han presentado problemas con lixiviados y gases (Martínez, 1991).

Estos sitios utilizados para la disposición de residuos sólidos son importantes fuentes contaminantes de agua subterránea, debido a la generación de lixiviados cuya composición tanto química como biológica tienen características consideradas nocivas a la salud (Knox y Canter, 1996; Pankow y Cherry, 1996). Cabe señalar que en estos confinamientos no se tenía un control estricto del tipo de desechos que se depositaban en ellos, lo que dificulta saber el tipo de impacto que pueden tener al agua subterránea.

4.5 Depósitos de combustible

La ZMCM cuenta con cuatro grandes sitios de depósito de combustible propiedad de Petróleos Mexicanos (PEMEX). En el Distrito Federal se localizan tres, en las delegaciones Azcapotzalco, Iztacalco y Alvaro Obregón, y uno en el Estado de México ubicado en el municipio de Tlalnepantla (Figura 9). En estos sitios de almacenamiento PEMEX tiene 40 tanques de almacenamiento con gasolina. Las capacidades de almacenamiento varían de 946,250 L (250,000 galones) a 32'172,500 L (8,500,000 galones) de gasolina por tanque. Se ha estimado que estos tanques presentan pérdidas promedio de hasta 2'000,000 de L/año (PEMEX, 1997).

Estas pérdidas reportadas por PEMEX son el resultado de la diferencia entre volúmenes almacenados en un lapso de tiempo, y si consideramos que parte de las pérdidas en estos tanques son por evaporación, es difícil evaluar la cantidad de combustible que puede afectar al agua subterránea.

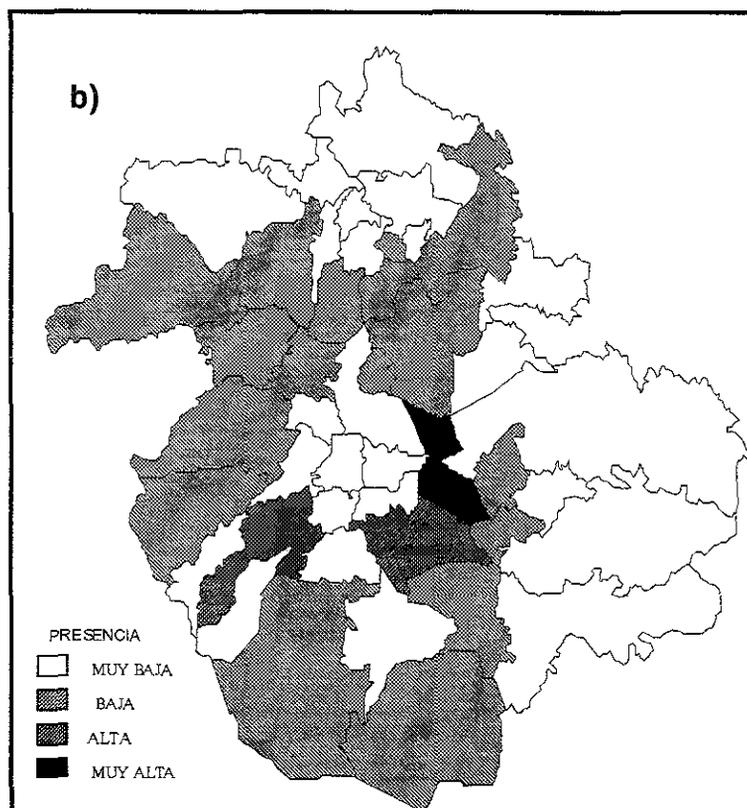
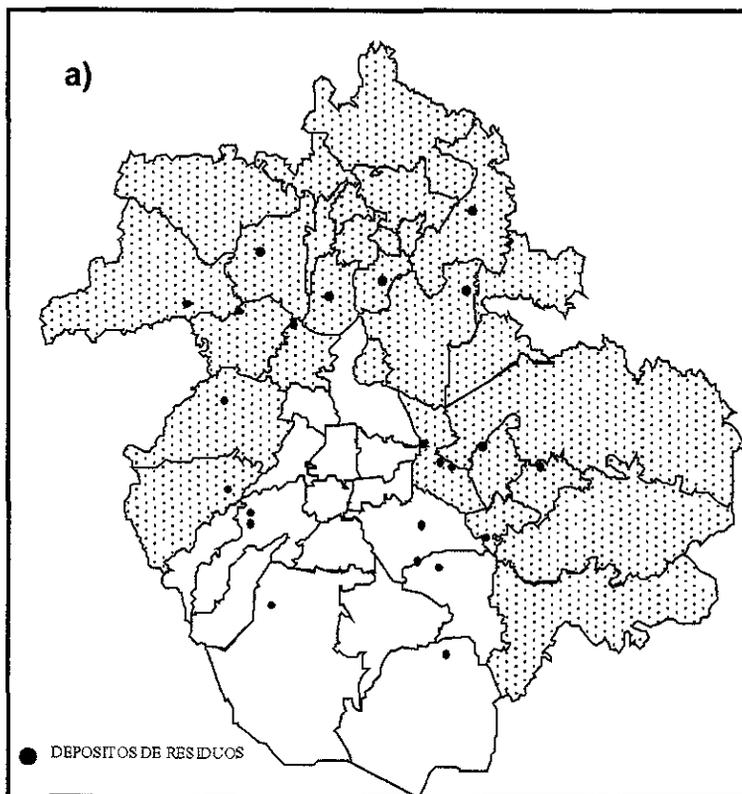


Figura 8. Distribución espacial (a) y presencia por entidad (b) de depósitos de residuos sólidos en la ZMCM.

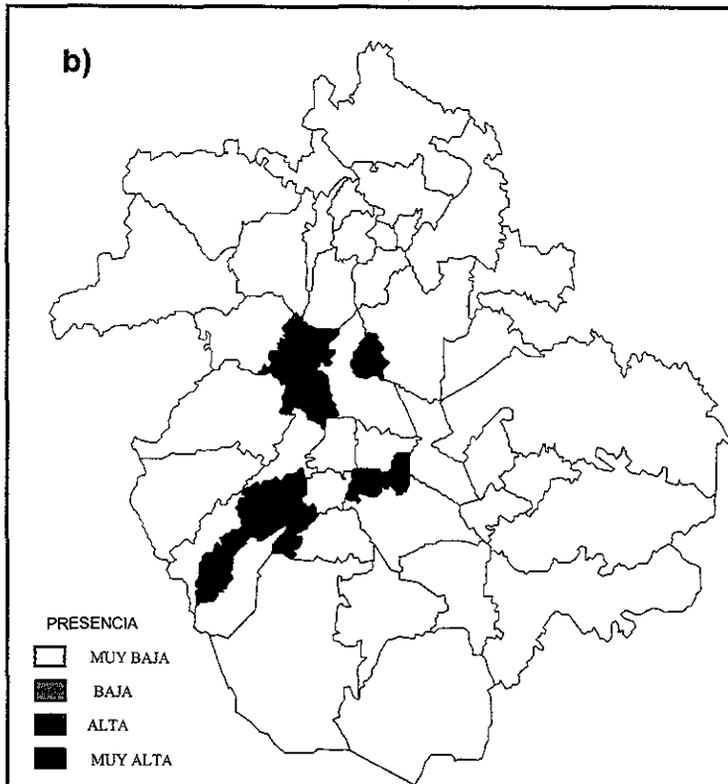
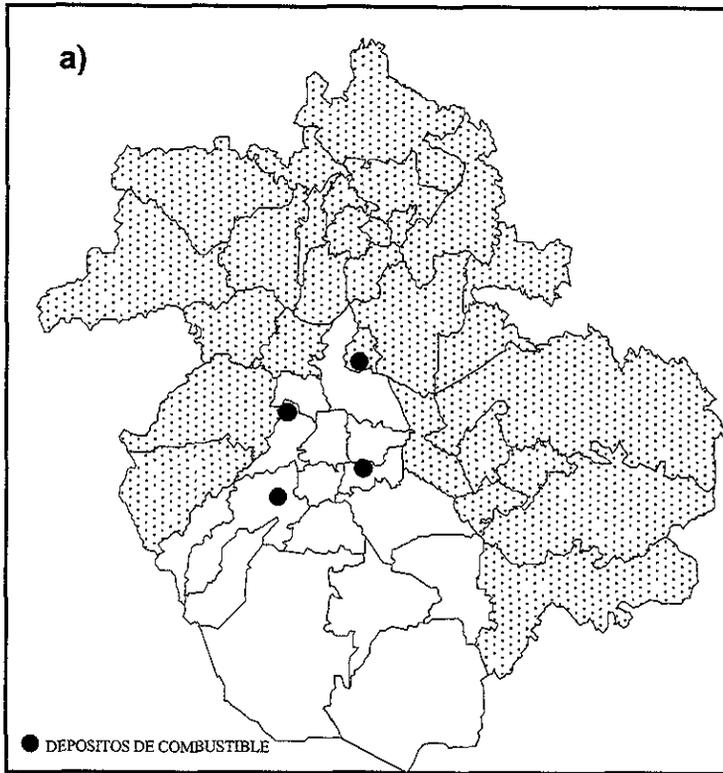


Figura 9. Distribución espacial (a) y presencia por entidad (b) de grandes depósitos de combustible en la ZMCM.

4.6 Pozos de extracción de agua

Se tiene un registro de 1,479 pozos de extracción en la ZMCM (DGCOH, 1993). Estos se localizan principalmente en la zona sur del Distrito Federal y en los municipios del este de la zona metropolitana. En el Distrito Federal se encuentra el 51 % del total de pozos.

El municipio de Texcoco presenta el mayor número de pozos, seguido de la delegación Coyoacán y el municipio de Ecatepec (Figura 10). Las clases en las que se representa la presencia de pozos por entidad se ven afectadas por la gran cantidad de pozos en el municipio de Texcoco, con 263 pozos, mientras que la segunda entidad que le sigue es Coyoacán, con 114 pozos, esta diferencia del más del doble de pozos hace que la clase denominada Alta no aparezca en la figura y las entidades queden clasificadas solo en las clases Muy Alta (Texcoco), Baja y Muy Baja.

Los pozos clausurados pero no tapados, pueden representar vías directas para el movimiento de contaminantes de la superficie hacia el acuífero (Mazari y Mackay, 1993). Otro de los efectos que trae consigo la extracción del agua subterránea es la inducción por despresurización y, por lo tanto, un aporte de aguas de distinta calidad provenientes de la capa de arcillas por consolidación. En el caso de la ZMCM, se presentan hundimientos hasta de 10 m en sitios con suelos arcillosos, como se ha reportado en el Centro Histórico, ocasionados por la explotación del agua subterránea (Mazari *et al.*, 1992; Lesser y Cortés, 1998).

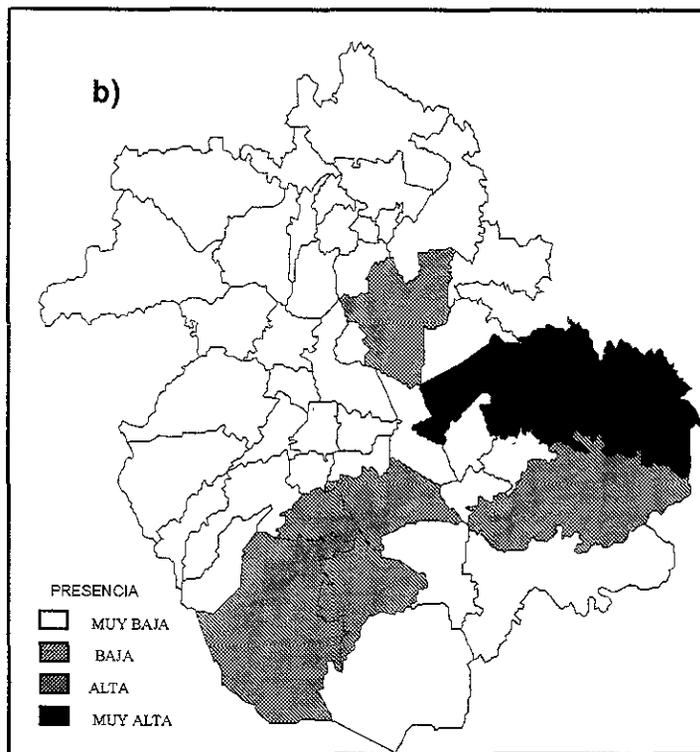
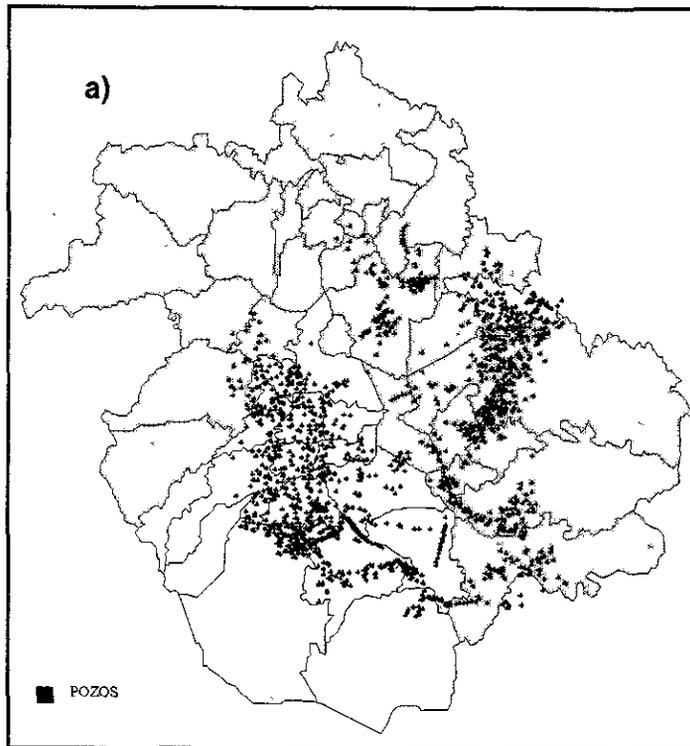


Figura 10. Distribución espacial (a) y presencia por entidad (b) de pozos de extracción de agua en la ZMCM.

4.7 Zona urbanizada

La zona urbanizada de la Ciudad de México, considerando el total de las 16 delegaciones del Distrito Federal y 27 municipios del Estado de México tiene un área de 1,153 km², esto es tomando en cuenta la zona urbanizada y excluyendo las grandes áreas verdes como parques recreativos, con un perímetro irregular. Las entidades centrales de la ZMCM presentan de un 70 a un 100% de área urbanizada, este porcentaje disminuye en las entidades circundantes, en el municipio de Teoloyucan no se pudo determinar el área urbanizada por medio de las imágenes de satélite (Figura 11).

El crecimiento del área urbana se ha dado principalmente hacia el norte y este del Distrito Federal en las tres últimas décadas. Este crecimiento ha afectado también a zonas consideradas de conservación ecológica que tienen una función importante en la recarga natural del sistema de acuíferos de la ZMCM, como es el caso en las delegaciones Cuajimalpa, Magdalena Contreras y Alvaro Obregón, por lo cual se debe tener especial cuidado en el uso de suelo en estas áreas.

Existe una gama de actividades urbanas que generan compuestos químicos que pueden tener efectos negativos en la calidad del agua y que son difíciles de representar espacialmente, como son, el vertimiento de aguas residuales, aceites, disolventes y plaguicidas, entre otros.

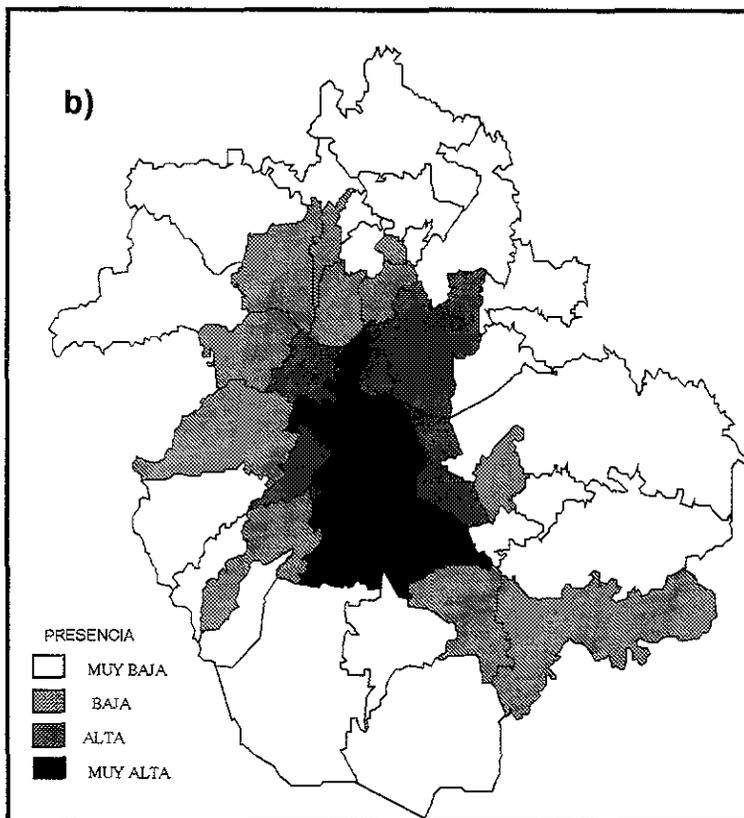
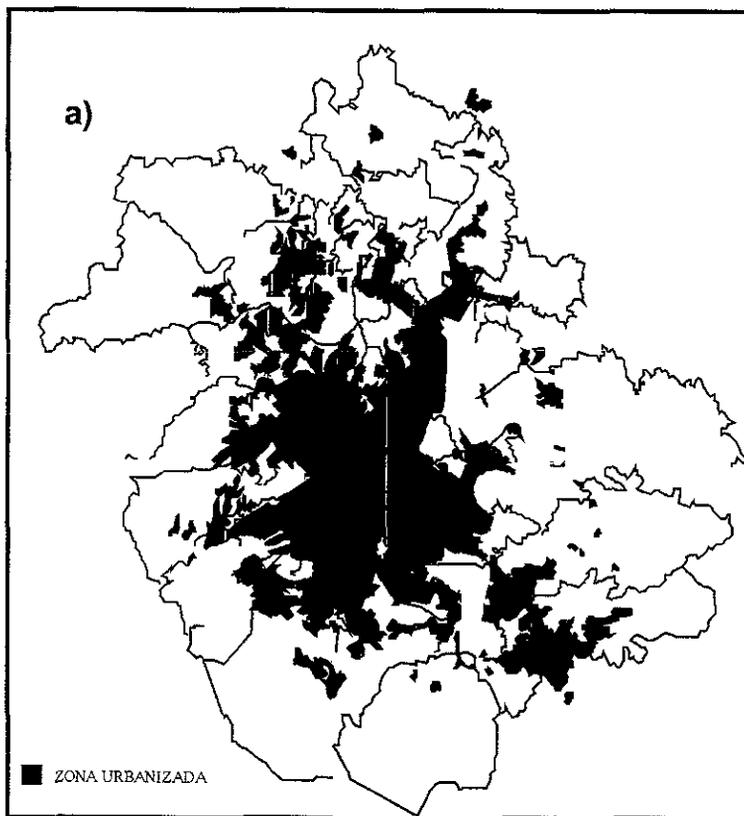


Figura 11. Distribución espacial (a) y presencia por entidad (b) de la zona urbanizada en la ZMCM.

4.8 Zonas de baja permeabilidad (Zona lacustre).

Los depósitos arcillosos de la zona lacustre se caracterizan por su baja permeabilidad, alta porosidad y alta compresibilidad, por lo que se ha considerado como una capa protectora a los sistemas de agua subterránea (Lesser, 1991).

En las delegaciones Cuauhtémoc, Atzacapotzalco, V. Carranza y Iztacalco como en los municipios Nezahualcóyotl, Atenco, Tultepec, Jaltenco y Nextlalpan, la zona lacustre abarca más del 80% de su territorio (Figura 10). En estas zonas el porcentaje de área ocupada por subsuelo arcilloso les confiere una posible protección para el transporte de contaminantes, debido a la baja permeabilidad.

También debe mencionarse que la capacidad de depuración que tienen las arcillas para ciertos contaminantes, se debe a que los cationes tienden a intercambiarse con la matriz arcillosa por ejemplo, los compuestos orgánicos se retardan y los sulfatos se oxidan en los primeros estratos (Durazo, 1996).

La baja permeabilidad de las arcillas y su efecto protector al sistema de acuíferos, se ha visto cuestionado por la detección de grietas y fracturas, que se han ocasionado principalmente por desagüe por despresurización, desecación y tectonismo (Mazari *et al.*, 1996).

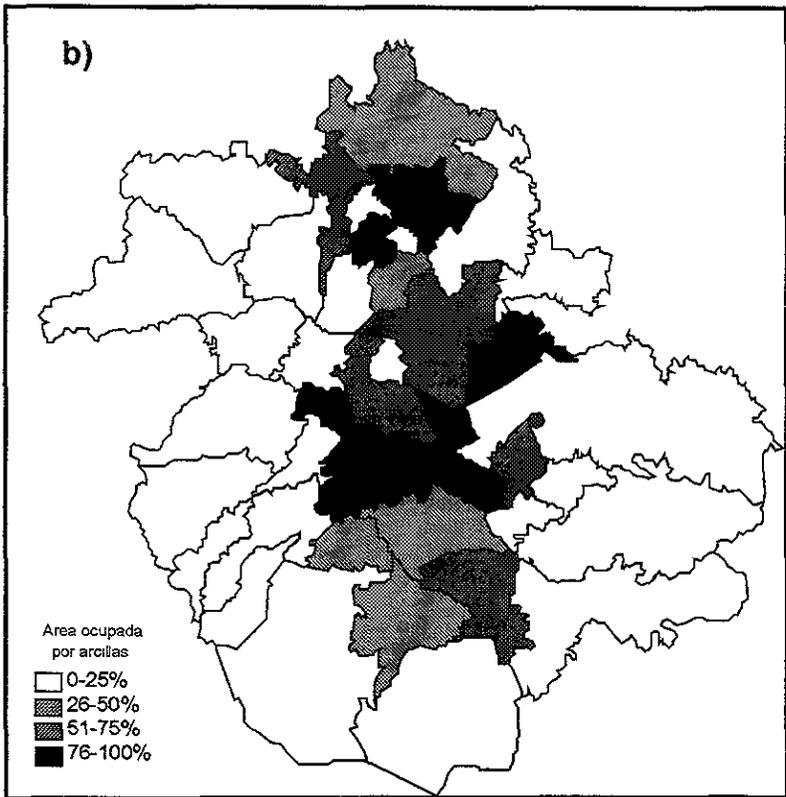
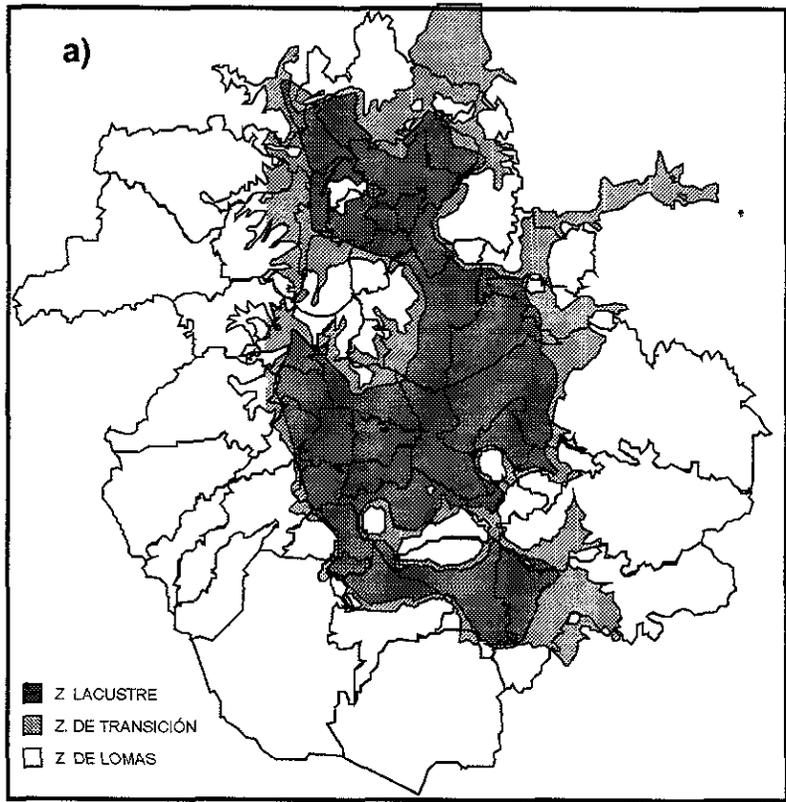


Figura 12. Zonas geológicas (a) y distribución espacial de arcillas (b) en la ZMCM.

4.9 Clasificación de entidades

El número de industrias, el drenaje primario, el porcentaje de zona urbanizada y el número de gasolineras presentaron una alta correlación entre sí ($r > 0.7$). Esto se reflejó en la clasificación numérica, ya que el mejor descriptor de la propensión a la contaminación del sistema de acuíferos resultó ser el número de industrias (o las variables correlacionadas con ésta). De este modo, las entidades políticas se ordenaron, en primer lugar, conforme al número de industrias y, en segundo término, por el porcentaje de subsuelo arcilloso y la presencia de depósitos de residuos sólidos (Figura 13).

La clasificación política divisiva requirió de la aplicación de siete análisis de componentes principales (ACP) para crear ocho grupos de entidades políticas. El primer ACP separó, por un lado, a un conjunto de 11 entidades claramente urbanizadas y, por el otro, a un conjunto heterogéneo de entidades tanto rurales como urbanizadas (pero en donde el drenaje profundo tenía una importancia baja).

Las 11 entidades urbanas incluyeron al 70% de las industrias, 88% del drenaje primario, 94% del drenaje profundo, 100% de los depósitos de combustible, 61% de la zona urbanizada y 71% de las gasolineras. Este conjunto se dividió con un segundo ACP para formar el grupo 1, con una sola entidad, y un conglomerado con las unidades restantes. Al aplicarse un tercer ACP a éste conglomerado, se formaron los grupos 2 y 3, con cuatro y seis entidades políticas, respectivamente (Figura 13).

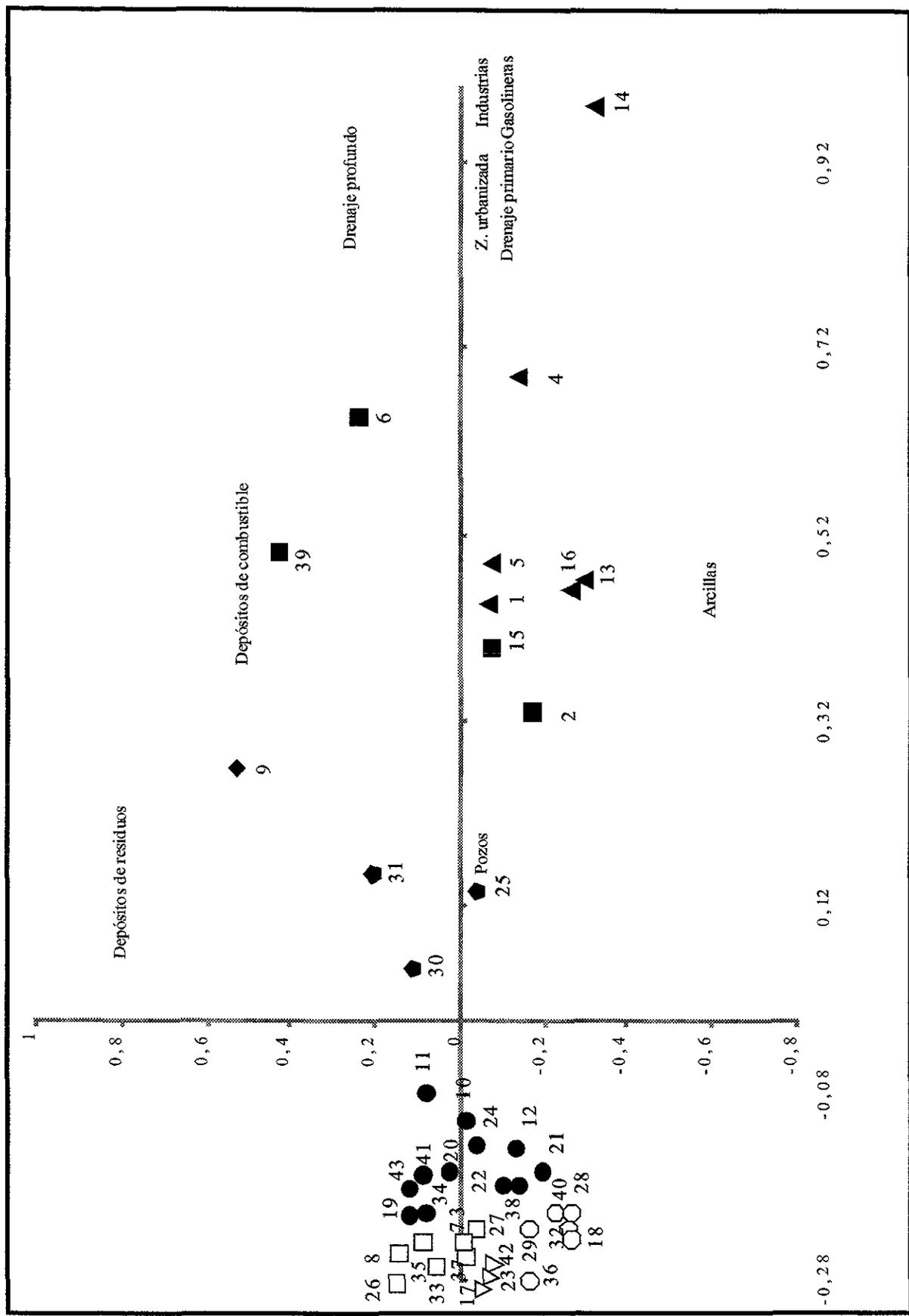


Figura 13. Agrupación numérica de las entidades de la ZMCM de acuerdo con fuentes contaminantes y subsuelo arcilloso; ◆ Grupo 1, ■ Grupo 2, ▲ Grupo 3, ◆ Grupo 4, ● Grupo 5, □ Grupo 6, ● Grupo 7 y ▽ Grupo 8.

El cuarto ACP se aplicó a las 32 entidades políticas que fueron agrupadas originalmente por el primer ACP. De este modo, se identificó al grupo 4, constituido por las tres entidades que exhibieron características fundamentalmente urbanas. El conglomerado de 29 entidades restantes se sometieron al quinto ACP, el cual generó uno conjunto de veinte entidades y otro de nueve. El sexto ACP, que se aplicó al conjunto más grande de estos dos y generó los grupos 5 y 6, mientras que el séptimo ACP, aplicado al conjunto más pequeño, creó los grupos 7 y 8.

4.10 Descripción de grupos de entidades

Grupo 1.- Se distinguió por estar conformado por una sola delegación, Alvaro Obregón. Presentó importancias altas y muy altas para todas las fuentes de contaminación, con la excepción del número de industrias, cuya importancia fue cercana a la media de todas las entidades políticas. No contiene subsuelo arcilloso (Tabla 4), por consiguiente, la propensión a la contaminación del sistema de acuíferos en esta entidad se catalogó como muy alto.

Grupo 2.- Reunió a cuatro entidades políticas (Naucalpan, Miguel Hidalgo, Iztapalapa y Coyoacán), cuya característica principal fue que la importancia del número de industrias, zona urbana, número de gasolineras y longitud del drenaje (primario y profundo), fue de alta a muy alta. Con respecto al número de pozos, las categorías de importancia que se obtuvieron variaron desde baja hasta muy alta. Asimismo, la importancia del subsuelo arcilloso en este grupo fue de baja a alta. Con la excepción de la entidad 39, no se detectaron depósitos de combustible. Consecuentemente, la

propensión a la contaminación del sistema de acuíferos en este grupo se catalogó como alta.

Tabla 4. Resultados del ACP y agrupación de entidades de la ZMCM.

Entidades	Industrias	Drenaje primario	Drenaje profundo	Depósitos de residuos	Depósitos de combustibles	Zona urbanizada	Gasoleras	Pozos	Arcillas	Grupos
9	-0.033	0.972	0.974	2.118	3.086	0.239	0.786	0.379	-1.076	1
39	0.789	0.317	3.655	0.695	3.086	0.706	0.979	-0.537	-0.552	
15	0.525	1.777	1.706	-0.728	-0.317	0.502	1.754	0.338	-0.435	2
6	2.082	1.639	2.662	2.118	-0.317	1.670	1.270	0.847	0.230	
2	0.033	1.219	0.693	-0.728	-0.317	1.582	1.173	1.621	0.198	
4	1.683	3.660	2.343	-0.728	-0.317	1.465	1.173	-0.334	0.356	
5	0.871	1.188	0.843	-0.728	3.086	1.903	0.205	-0.232	1.652	
1	0.899	1.074	0.356	-0.728	3.086	1.903	0.205	0.257	1.452	3
16	1.089	1.486	0.843	-0.728	-0.317	1.903	0.979	-0.334	1.622	
13	1.137	1.153	0.000	-0.728	-0.317	1.903	2.238	-0.028	1.335	
14	4.185	1.915	1.481	-0.728	-0.317	1.874	4.077	0.236	1.635	
25	1.020	-0.243	-0.525	0.695	-0.317	0.794	0.495	1.458	0.375	
31	1.193	-0.460	-0.525	3.541	-0.317	1.115	0.108	-0.232	1.608	4
30	0.657	0.595	0.056	0.695	-0.317	-0.257	0.495	-0.375	-1.071	
20	-0.597	-0.610	-0.525	0.695	-0.317	0.181	-0.473	-0.619	-0.042	
41	-0.467	-0.610	-0.235	0.695	-0.317	-0.053	-0.570	-0.660	-0.582	
24	-0.480	-0.610	-0.525	0.695	-0.317	-0.170	-0.570	0.134	0.670	
10	-0.304	-0.610	-0.525	0.695	-0.317	-0.199	-0.666	0.257	0.544	
19	-0.344	-0.610	-0.364	0.695	-0.317	-0.111	-0.473	-0.639	-1.076	
21	-0.583	-0.610	-0.525	-0.728	-0.317	-0.257	-0.279	-0.700	0.511	5
43	-0.382	-0.610	-0.413	0.695	-0.317	-0.199	-0.279	-0.700	-1.076	
34	-0.437	-0.610	-0.525	0.695	-0.317	-0.462	-0.570	0.216	-0.612	
22	-0.491	-0.610	-0.525	-0.728	-0.317	-0.257	-0.279	0.664	-0.612	
12	-0.501	-0.223	-0.413	-0.728	-0.317	-0.287	-0.473	1.336	-0.312	
38	-0.528	-0.567	-0.525	-0.728	-0.317	-0.900	-0.473	4.655	-0.419	
11	-0.138	0.151	-0.525	0.695	-0.317	-0.433	0.108	1.397	-1.003	
37	-0.642	-0.610	-0.525	-0.728	-0.317	-0.987	-0.473	-0.700	-1.076	
8	-0.634	-0.610	-0.525	0.695	-0.317	-0.987	-0.570	-0.252	-1.076	
26	-0.669	-0.587	-0.525	0.695	-0.317	-0.783	-0.570	-0.700	-1.076	
7	-0.608	-0.480	-0.525	-0.728	-0.317	-0.491	-0.666	-0.680	-1.076	6
27	-0.545	-0.610	-0.525	-0.728	-0.317	-0.841	-0.570	1.071	-1.033	
3	-0.603	-0.610	-0.525	-0.728	-0.317	-0.579	-0.473	-0.700	-1.076	
33	-0.577	-0.610	-0.525	0.695	-0.317	-0.900	-0.473	-0.700	-1.076	
35	-0.569	-0.610	-0.525	0.695	-0.317	-0.764	-0.570	-0.537	-0.555	
36	-0.688	-0.610	-0.525	-0.728	-0.317	-1.017	-0.570	-0.700	0.405	
18	-0.686	-0.549	-0.525	-0.728	-0.317	-0.958	-0.763	-0.232	1.559	
32	-0.689	-0.610	-0.525	-0.728	-0.317	-0.958	-0.763	-0.700	1.406	7
40	-0.663	-0.610	-0.525	-0.728	-0.317	-0.666	-0.763	-0.680	1.264	
29	-0.684	-0.610	-0.525	-0.728	-0.317	-0.608	-0.763	-0.700	0.326	
28	-0.696	-0.610	-0.525	-0.728	-0.317	-0.783	-0.763	-0.700	1.652	
23	-0.620	-0.610	-0.525	-0.728	-0.317	-0.987	-0.763	-0.436	-0.632	
17	-0.656	-0.610	-0.525	-0.728	-0.317	-0.871	-0.666	-0.354	-0.880	8
42	-0.646	-0.610	-0.525	-0.728	-0.317	-0.987	-0.763	-0.700	-0.372	

Grupo 3.- Conjuntó a seis entidades políticas (G. A. Madero, Iztacalco, Azcapotzalco, Venustiano Carranza, Benito Juárez y Cuauhtémoc), en donde la zona urbanizada ocupó prácticamente toda la superficie de cada entidad, por lo que su importancia se clasificó como muy alta, al igual que la del drenaje primario. La importancia del número de industrias y el número de gasolineras varió de alta a muy alta, mientras que la del número de pozos fue de moderada a alta. Por su parte, el drenaje profundo obtuvo las categorías de importancia baja o muy alta. Asimismo, la importancia del subsuelo arcilloso fue muy alta en todas las entidades, con la excepción de una. En ninguna de las entidades de este grupo se encontraron basureros y sólo en dos se localizaron depósitos de combustible (Tabla 4). De esta forma, la propensión a la contaminación del sistema de acuíferos en este grupo se catalogó de baja, con la excepción de la delegación G.A. Madero, que se clasificó como de propensión muy alta.

Grupo 4.- Las tres entidades que lo componen (Naucalpan, Ecatepec y Nezahualcóyotl) presentaron características fundamentalmente urbanas. En particular, éstas se reflejaron en el número de industrias, número de gasolineras y el número de basureros, que obtuvieron categorías de importancia entre altas y muy altas. Sin embargo, la importancia del drenaje profundo fue de baja a muy baja, mientras que la del drenaje primario fue de moderada a alta. En contraste con las otras dos entidades del grupo, el municipio de Naucalpan obtuvo un valor de importancia bajo para la superficie urbanizada y de importancia muy baja para el subsuelo arcilloso. Asimismo, la importancia del drenaje primario y del número de pozos varió de muy baja a muy alta. No se ubicaron depósitos de combustible en las entidades del grupo (Tabla 4). De

acuerdo a la tabla de decisión Naucalpan, Ecatepec y Nezahualcóyotl, tienen una propensión a la contaminación muy alta, alta y baja, respectivamente.

Grupo 5.- Las 12 entidades políticas de este grupo (Coacalco, Tultitlán, Chimalhuacán, Tláhuac, Atizapán de Zaragoza, Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli, La Paz, Chalco, Xochimilco, Texcoco y Tlalpan), se diferenciaron por la baja importancia del número de industrias, el drenaje primario, el drenaje profundo, el número de gasolineras y la superficie urbanizada. Las excepciones a este patrón del grupo fueron Tlalpan, que presentó importancias altas para el drenaje primario y el número de gasolineras, y Coacalco, que obtuvo una importancia alta para la superficie urbanizada. En cambio, la importancia del número de pozos varió de baja a muy alta, sobresaliendo en las entidades de Texcoco, Tlalpan y Xochimilco. Asimismo, la importancia de los basureros varió de baja a alta. La importancia del subsuelo arcilloso, por otra parte, fue de muy baja a alta. No se detectaron depósitos de combustible (Tabla 4). Por todo ello, la propensión a la contaminación del sistema de acuíferos en este grupo se catalogó como baja.

Grupo 6.- Aglutinó a ocho entidades, Tepozotlán, Milpa Alta, Huixquilucán, Magdalena Contreras, Ixtapaluca, Cuajimalpa, Nicolás Romero y Tecamac, que resultaron con importancias de bajas a muy bajas para todas las fuentes de contaminación, con la excepción de la presencia de basureros en cuatro entidades (Milpa Alta, Huixquilucan, Nicolás Romero y Tecamac) y el número de pozos en Ixtapaluca. La superficie de subsuelo arcilloso obtuvo importancias muy bajas en todas las entidades, menos en

Tecamac, que presentó una importancia baja (Tabla 4). De este modo, la propensión a la contaminación del sistema de acuíferos en este grupo se catalogó como baja.

Grupo 7.- Agrupó seis entidades (Teoloyucán, Atenco, Nextlalpan, Tultepec, Melchor Ocampo y Jaltenco) en donde la importancia de todas las fuentes de contaminación fue baja. La importancia del subsuelo arcilloso fue de alta a muy alta (Tabla 4). Así, la propensión a la contaminación del sistema de acuíferos en este grupo se catalogó como muy baja.

Grupo 8.- Las tres entidades que conformaron este grupo, Chicoloapan, Acolman y Zumpango, presentaron importancias bajas para todas las variables (Tabla 4). Consiguientemente, la propensión a la contaminación del sistema de acuífero en este grupo se catalogó como baja.

4.11 Entidades propensas a la contaminación

Alvaro Obregón, Gustavo A. Madero y Naucalpan fueron catalogadas como de propensión muy alta a la contaminación de agua subterránea. Coyoacán, Iztapalapa, Miguel Hidalgo, Ecatepec y Tlalnepanitla se catalogan como de propensión alta (Figura 14).

Es importante destacar que las entidades más propensas a la contaminación del agua subterránea están localizadas en las zonas geológicas de lomas y de transición, con una conductividad hidráulica relativamente alta.

Si tomamos en cuenta que la detección de contaminantes en los pozos de extracción puede ser de años o décadas posteriores a que ocurrió el derrame en la superficie y que una vez contaminado el acuífero es sumamente difícil su restauración (Mackay *et al.*, 1985), se debe poner especial cuidado en estas entidades de la ZMCM.

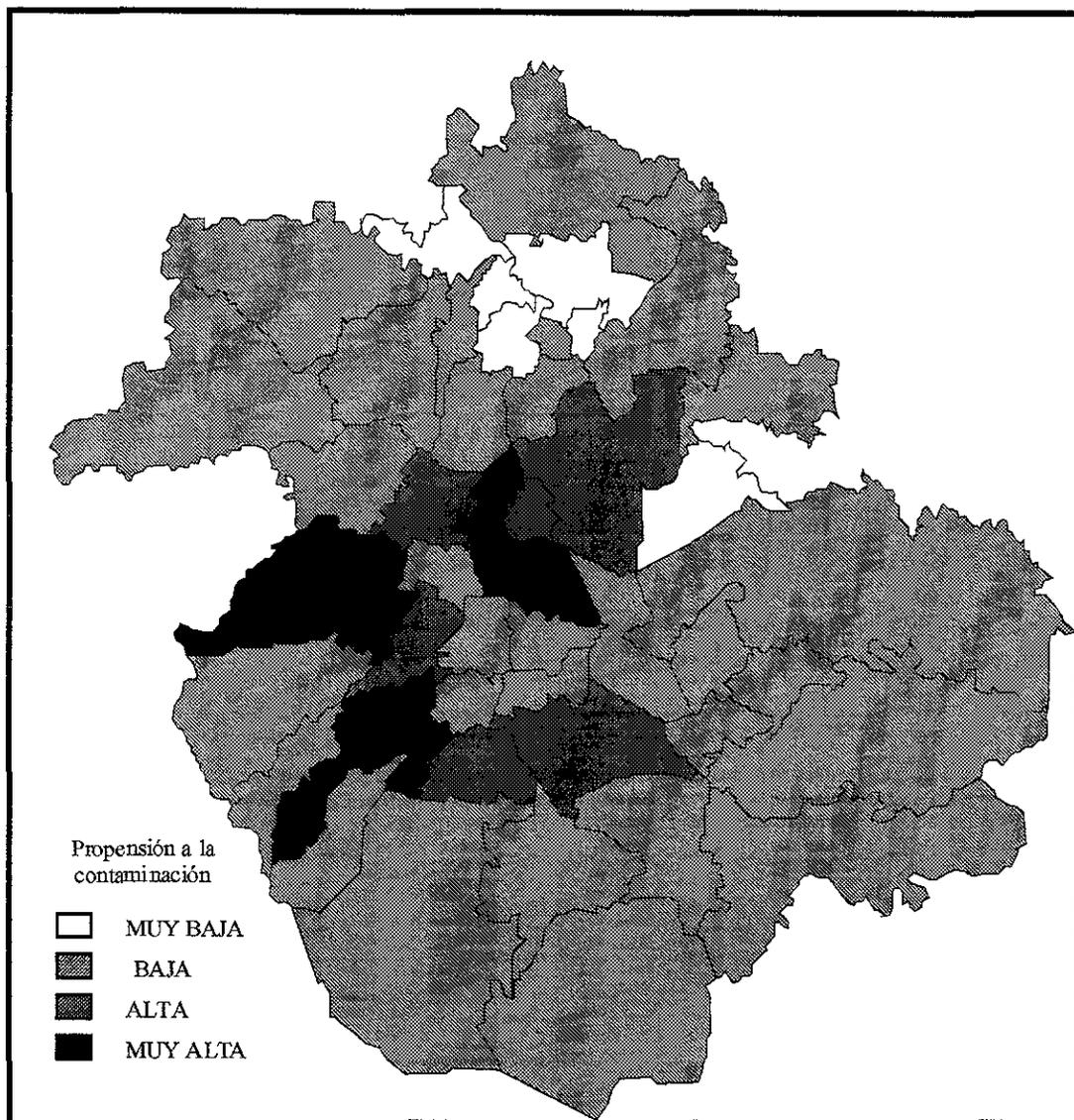


Figura 14. Entidades propensas a la contaminación de agua subterránea en la ZMCM.

La contaminación del sistema de acuíferos de la ZMCM ocasionaría serios problemas para el suministro de alrededor de 18 millones de habitantes en esta área urbana. El importar el agua que requiere la urbe de otras cuencas, como es el caso de los sistemas Cutzamala y Lerma, tiene un costo tanto económico como ecológico elevado, además de los problemas sociales que ocasiona en las cuencas donde esta agua se utilizaba para riego y generación de energía eléctrica (Ezcurra y Mazari-Hiriart, 1996).

Se estima que en el año 2010 la ZMCM contará con una población de 21 millones de habitantes y de seguir las tendencias actuales en el consumo de agua, se requerirán aproximadamente 80 m³/s de agua para satisfacer las necesidades de la ZMCM (Merino, en prensa). Este problema se acrecienta debido a que las áreas naturales de recarga del sistema de acuíferos como son la Sierra del Chichinautzin y la Sierra de la Cruces están siendo impactadas por actividades humanas que disminuyen la recarga.

La problemática de la contaminación de los acuíferos es compleja, por lo cual se requieren análisis específicos para cada una de las fuentes contaminantes en la ZMCM, estos trabajos deben incorporar atributos espaciales con una mayor resolución, así como volúmenes de residuos, volúmenes de explotación, volúmenes de almacenamiento, entre otros, lo que permitiría obtener las zonas de riesgo a la contaminación del sistema de acuíferos de la ZMCM.

El suministro de agua a la ZMCM seguirá siendo uno de los principales problemas de la ciudad en el presente siglo, el cual requiere acciones a corto y largo plazo, como son el consientizar a la población del valor del recurso y las consecuencias de un inadecuado

manejo del mismo, así como el tratamiento de las aguas residuales y su reutilización, que en la actualidad solo el 10 % del agua residual se trata, utilizandola en el riego de áreas verdes, llenado de lagos y en menor medida en ciertas actividades industriales.

5. CONCLUSIONES

La importancia del acuífero en la ZMCM se debe a que el 70% del agua que se consume en la ciudad, es agua subterránea, por lo que es importante evitar que se contamine por las actividades de la misma ciudad, como es el caso de contaminación por compuestos orgánicos.

Las fuentes contaminantes consideradas en este estudio están localizadas principalmente en las entidades centro de la ZMCM, mientras que los municipios del Estado de México, que se incorporaron recientemente a la megalópolis, presentan menor número de fuentes contaminantes.

A nivel de entidad política, los mejores indicadores de la propensión a la contaminación del sistema de acuíferos son, el número de industrias y los suelos de tipo arcilloso (zona lacustre).

Las entidades se clasifican en ocho grupos de acuerdo con la importancia de las fuentes de contaminación y el porcentaje de suelo arcilloso.

Las entidades más propensas a la contaminación del agua subterránea son, con propensión muy alta, Alvaro Obregón, Gustavo A. Madero y Naucalpan, y con propensión alta Coyoacán, Iztapalapa, Miguel Hidalgo, Ecatepec y Tlalnepantla. Consecuentemente, se tendrán que tomar medidas preventivas para evitar la contaminación del sistema de acuíferos, especialmente en estas entidades.

El suministro de agua en la ZMCM será uno de las grandes tareas a resolver en el presente siglo, por eso se deben aumentar los programas de prevención de contaminación del agua subterránea y manejo racional de los recursos hídricos en la ZMCM.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

6.0 BIBLIOGRAFÍA

Alley, W.M. Ed. (1993), *Regional Ground-Water Quality*, Van Nostrand Reinhold, New York, 634 p.

Bassols, A. (1966), La Ciudad de México y su región económica. Simposio sobre el Valle y la Ciudad de México, Unión Geográfica Internacional, México.

Cavallaro, A., Conrardi, C., De Felice, G. y Grassi, P. (1985), Underground water pollution in Milan by industrial chlorinated organic compounds, En *Effects of Landuse upon Fresh Waters*. Solbe, L.G., Ed., Ellis Harwood, Chichester UK: pp. 68-84.

Consejo Nacional de Investigación (1995), *El agua y la Ciudad de México*, Consejo Nacional de Investigación, México, pp. 353.

DDF (1982), *El Sistema Hidráulico del Distrito Federal*. Secretaría de Obras y Servicios, 1:29.

DDF (1988), *Manual de exploración geotécnica*, Secretaria General de Obras, Departamento del Distrito Federal, México, 33 p.

DGCOH (1993), Fuentes de contaminación al agua subterránea y alternativas de saneamiento. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Departamento del Distrito Federal, México, Contrato 3-33-1-0172, 191 p.

DGCOH (1996), *Plan maestro de drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México 1994-2010*, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, México, 300 p.

Digby, P.G.N. y Kempton, R.A. (1987), *Multivariate analysis of ecological communities*, Chapman and Hall, London. 206 p.

Durazo, J. (1996), "Ciudad de México, Acuitardo superficial y contaminación acuífera", *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XI, núm. 2: pp. 5-14.

ESRI (1997), ARC-INFO Version 7.1.1, Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, USA.

Ezcurra, E. (1992), Programa computacional ORDEN, Instituto de Ecología, Universidad Autónoma de México.

Ezcurra, E. (1992), Crecimiento y colapso en la Cuenca de México. *Ciencias*, No. 25:13-27.

Ezcurra, E. y Mazari-Hiriart, M. (1996), "Are Megacities Viable: A cautionary tale from Mexico City", *Environment* Vol. 38, núm. 1: pp. 6-34.

Fielding, M., Gibson, T.M. y James, H.A. (1981), "Levels of trichloroethylene, tetrachloroethylene and p-dichlorobenzene in groundwaters", *Environ. Technol. Letters* 2, pp. 545-550.

Garza, G. y Damián, A. (1991), Ciudad de México. Etapas de crecimiento, infraestructura y equipamiento. En *Espacio y vivienda en la ciudad de México*. Schteingart, M. (coordinadora), El Colegio de México y I Asamblea de Representantes del Distrito Federal, pp.21-49

IMP (1997), Sistemas de información geográfica aplicados a la información cartográfica del proyecto IMADA, Instituto Mexicano del Petróleo, GCA-097085, México, pp. 30.

IG (1990), *Atlas Nacional de México*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Mapa III.3.5. Sistema Urbano. México DF.

INEGI (1993), *Ciudad de México (área metropolitana)*, Perfil Sociodemográfico, XI Censo General de Población y Vivienda, 1990, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México, pp.85

INEGI (1994), *Censos Económicos 1994*, Resultados Oportunos, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México, 385 p.

INEGI (1995), *Estados Unidos Mexicanos*. Tabulados básicos. Censo de población y vivienda 1995, pp.569.

Knox, R.C. y Canter, W. (1996), "Prioritization of ground water contaminants and sources", *Water, Air and Soil Pollution* Vol. 88, pp. 205-226.

Lesser, J.M. (1991), Interacción de zonas contaminadas por fugas de tanques almacenadores de gasolina. DGCOH, Contrato 1-33-0693.

Lesser, J.M. y Cortés, M.A. (1998), "El hundimiento del terreno en la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje", *Ingeniería Hidráulica en México* Vol. XIII, núm. 3, pp. 13-18.

López, R. (1987), Geomorfología en Atlas de la Ciudad de México. Departamento del Distrito Federal y El Colegio de México, 29-33.

Mackay, D.M., Roberts, P.V. y Cherry, J.A. (1985), "Transport of organic contaminants in groundwater", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 19, núm. 5, pp. 384-392.

Mackay, D.M. y Cherry, J.A. (1989), "Groundwater contamination: pump-and-treat remediation", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 23, núm 6, pp. 630-636.

Marsal, R.J. y Mazari, M. (1969), *El subsuelo de la Ciudad de México*, Facultad de Ingeniería, Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Universidad Autónoma Nacional de México (2 vols).

Martínez, J. (1991), *Geotécnia del tiradero de Santa Cruz Meyehualco*, Simposio Geotécnia y Medio Ambiente, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., México, pp. 85-90.

Mazari, M., Mazari, M., Ramírez, C. y Alberro, J. (1992), Efectos de la extracción de agua en la zona lacustre del valle de México, En *Volumen Raúl J. Marsal*; Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., México, pp. 37-48.

Mazari, M. y Mackay, D.M. (1993), "Potential for Groundwater Contamination in Mexico City", *Environ. Sci. Technol.* Vol. 27, núm 5, 794-802.

Mazari, M., J. Alberro, M. Mazari y S. González (1996), Agrietamiento de arcillas lacustres y su relación con el uso y reúso del agua, *Hacia el tercer milenio*, M. Mazari compilador, El Colegio Nacional, México.

Merino, H. (en prensa), El Sistema Hidráulico de la Ciudad de México, En Garza Gustavo, *Atlas de la Ciudad de México*, El Colegio de México-Gobierno del D.F., México.

Mooser, F. (1974), *Mapa Geológico de la Cuenca de México y Zonas Colindantes*, Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Obras Hidráulicas.

Mooser, F. (1987), Geología, G. Garza (comp.) *Atlas de la ciudad de México*, Departamento del Distrito Federal y El Colegio de México, México, pp. 23-29.

Mooser, F. (1990), Estratigrafía y estructura del valle de México en el subsuelo de la cuenca de México y su relación con la ingeniería de cimentación, a cinco años del sismo. *Revista Mexicana de Mecánica de Suelos*.

National Research Council (1984), Geophysics Study Committee, Groundwater Contamination, National Academy Press, Washington D.C., 179 pp.

Noy-Meir, I. (1973), "Data transformations in ecological ordinations I. Some advantages of non-centering", *J. of Ecology* Vol. 61, pp. 753-760.

Pankow, J.F. y Cherry, J.A. Eds. (1996), *Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater*, Waterloo Press, Portland, Oregon, 522 pp..

Patrick, R., Ford, E. y Quarels, J. (1987), *Groundwater Contamination in the United States*, University of Pennsylvania Press, Pennsylvania, PA, 2nd ed., 513.

PEMEX (1997), Datos básicos de estaciones de servicio en el Valle de México. Gerencia Comercial Zona Valle de México, Petróleos Mexicanos, no publicado.

Pick J.B. y Butler, E.W. (1997), *Mexico Megacity*, Westview Press., Boulder, Colorado, pp. 409.

Pielou, E.C. (1984), *The interpretation of ecological data: a primer on classification and ordination*, John Wiley & Sons, New York, 263 pp.

Pupp, C. (1985), *An Assessment of Ground Water Contamination in Canada*, Part 1, Environmental Interpretation Division, Environment Canada, Quebec, Canada, 77 p.

Riosvelasco, P. (1994), *La disposición final de desechos sólidos en la Ciudad de México*, Dirección General de Servicios Urbanos, Departamento del Distrito Federal, México, pp. 9.

Rivett, M.O., Lerner, D.N. y Lloyd, J.W. (1990), *Chlorinated Solvents in UK Aquifers*, J. of the Institution of Water and Environmental Management 4, pp. 242-250.

Sax, N.R. y Lewis, R.J. Sr. (1989), *Dangerous properties of industrial materials*, 7th ed. Vol II, Van Nostrand Reinhold, New York.

Serra-Puche, M.C., (1990), El pasado ¿una forma de acercarnos al futuro: 25 mil años de asentamientos en la Cuenca de México. En *Problemas de la Cuenca de México*; Kumate, J.; Mazari, M., Eds.; El Colegio Nacional, México. pp. 3-28.

Schteingart, M. (1991). *Espacio y vivienda en la Ciudad de México*. Colegio de México y I Asamblea de Representantes del Distrito Federal, pp. 317.

Schwille, F. (1988), *Dense Chlorinated Solvents in Porous and Fractured Media: Model Experiments* (Engl. transl.), Lewis Publ. Inc., Ann Arbor, MI, 146 p.

Sitting, M. (1985), *Handbook of toxic and hazardous chemicals and carcinogens*, 2nd ed, Noyes Publ., Park Ridge, New Jersey.

Sokal, R.R. y Rohlf, F.J. (1995), *Biometry*, W.H. Freeman and Company, New York, 87 p.

Trouwborst, T. (1981), Groundwater pollution by volatile halogenated hydrocarbons; sources of pollution and methods to estimate their relevance, *Science of the Total Environment* 21, pp. 41-46.

Verschueren, K. (1983), *Handbook of environmental data on organic chemicals*, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold Co., New York.

Westrick, J.J. (1990), National Survey of Volatile Organic Compounds in Ground and Surface Waters, En *Significance and Treatment of Volatile Organic Compounds in Water Supplies*, Ram, N.M., Christman, R.F. y Cantor, K.P. (Eds.). Lewis Publishers, Inc. Chelsea, MI, pp. 103-125.