



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA

**DISEÑO ESPACIAL DE UNA RED DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA MEDIANTE EL ANÁLISIS MULTICRITERIO EN UN ENTORNO SIG. ACUÍFERO TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO.**

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA**

**PRESENTA**

**KARINA PATONI MARTÍNEZ**

**DIRECTORA DE TESIS**

**DRA. MARÍA VICENTA ESTELLER ALBERICH**

**CODIRECTOR DE TESIS**

**DR. EN I. JOSÉ LUIS EXPÓSITO CASTILLO**

OCTUBRE DE 2021

# Contenido

<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
Introducción.....	2
Justificación.....	4
Hipótesis .....	6
Objetivos .....	6
<b>Capítulo 2. Área de estudio</b> .....	<b>8</b>
2.1. Localización y características generales .....	9
2.2. Uso del suelo y cobertura vegetal .....	12
2.3. Geología .....	14
2.3.1. Marco general.....	14
2.3.2. Unidades litoestratigráficas.....	17
2.4. Hidrología superficial .....	26
2.5. Hidrología subterránea.....	28
2.5.1. Unidades hidroestratigráficas .....	28
2.5.2. Piezometría y comportamiento hidráulico.....	33
2.5.3. Censo de aprovechamientos .....	39
2.5.4. Balance y disponibilidad del acuífero .....	41
2.5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua del acuífero .....	43
2.6. Fenómenos de subsidencia y agrietamiento .....	46
2.7. Población y desarrollo socioeconómico .....	49
<b>Capítulo 3. Marco Teórico</b> .....	<b>51</b>
3.1. Composición química del agua subterránea .....	52
3.1.1. Procesos hidrogeoquímicos.....	52
3.1.2. Contaminación del agua subterránea .....	55
3.1.3. Calidad del agua subterránea para diferentes usos .....	57
3.2. Monitoreo del agua subterránea .....	58
3.2.1. Diseño de redes de monitoreo de la calidad del agua subterránea .....	60
3.2.2. Enfoques para el diseño de redes de monitoreo de la calidad del agua subterránea.....	61

3.3. El análisis multicriterio en un entorno SIG .....	62
3.4. Casos de estudio sobre el diseño de redes de monitoreo de calidad del agua subterránea.....	66
<b>Capítulo 4. Materiales y métodos.....</b>	<b>69</b>
4.1. Proceso metodológico .....	70
4.2. Recopilación, análisis y síntesis de información disponible .....	71
4.3. Etapa 1: Establecimiento del modelo conceptual hidrogeológico del acuífero.....	71
4.4. Etapa 2: Identificación, selección y generación de criterios para el diseño de una red de monitoreo de calidad del agua subterránea.....	74
4.4.1. Aplicación del Análisis Multicriterio en el diseño de una red de monitoreo de calidad del agua subterránea.....	77
4.4.2. Definición del objetivo y selección de criterios.....	78
4.4.3. Proceso de ponderación mediante el método AHP .....	89
4.4.4. Agregación de criterios.....	92
4.5. Etapa 3: Priorización de áreas de monitoreo .....	93
4.6. Etapa 4: Propuesta para el establecimiento de una red de monitoreo de calidad del agua subterránea en el acuífero Texcoco.....	93
<b>Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados.....</b>	<b>99</b>
5.1. Modelo conceptual hidrogeológico del acuífero.....	100
5.2. Aplicación del análisis multicriterio en el diseño de una red de monitoreo de calidad del agua subterránea .....	104
5.2.1. Identificación y selección de criterios .....	104
5.2.2. Ponderación de criterios mediante el método AHP.....	132
5.2.3. Agregación de criterios.....	135
5.2.4. Priorización de áreas de monitoreo .....	137
5.3. Propuesta de una red de monitoreo de calidad del agua subterránea en el acuífero Texcoco.....	139
Conclusiones .....	151
Recomendaciones.....	153
Referencias .....	154

# Índice de figuras

<b>Figura 2.1.</b>	Localización del área de estudio. Acuífero Texcoco.....	9
<b>Figura 2.2.</b>	Mapa hipsométrico del acuífero.....	11
<b>Figura 2.3.</b>	Mapa del uso de suelo y cobertura vegetal del acuífero.....	13
<b>Figura 2.4.</b>	Mapa geológico del acuífero y localización de las secciones geológicas.....	16
<b>Figura 2.5.</b>	Columnas estratigráficas de los pozos profundos perforados en la Cuenca de México.....	17
<b>Figura 2.6.</b>	Sección geológica A-A' del acuífero.....	22
<b>Figura 2.7.</b>	Sección geológica B-B' del acuífero.....	22
<b>Figura 2.8.</b>	Localización de los pozos perforados para investigar las concentraciones de salmueras, así como las columnas sedimentarias del acuífero salino.....	24
<b>Figura 2.9.</b>	Correlación sedimentológica de muestras obtenidas con una máquina rotatoria con barril para recuperación continua de sedimentos.....	25
<b>Figura 2.10.</b>	Mapa de hidrología superficial del acuífero.....	27
<b>Figura 2.11.</b>	Mapa de unidades hidroestratigráficas y localización de la sección hidrogeológica A-A'. Acuífero Texcoco.....	31
<b>Figura 2.12.</b>	Sección hidrogeológica A-A'. Acuífero Texcoco.....	32
<b>Figura 2.13.</b>	Mapa de profundidad del nivel del agua subterránea del acuífero Texcoco. Año 2018.....	35
<b>Figura 2.14.</b>	Mapa piezométrico del acuífero Texcoco. Año 2018.....	36
<b>Figura 2.15.</b>	Mapa de isoabatimientos del nivel piezométrico del acuífero Texcoco. Periodo 1969-2018) .....	38
<b>Figura 2.16.</b>	Volumen concesionado y su distribución por usos consuntivos en el acuífero Texcoco.....	40
<b>Figura 2.17.</b>	Ramal de pozos Peñón-TEXCOCO.....	41
<b>Figura 2.18.</b>	Mapa de velocidad de hundimiento en centímetros por año, periodo 1999-2008.....	48
<b>Figura 3.1.</b>	Fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea.....	56
<b>Figura 3.2.</b>	Ciclo del monitoreo del agua subterránea.....	58
<b>Figura 4.1.</b>	Diseño metodológico de la investigación.....	70
<b>Figura 4.2.</b>	Diagrama de flujo para la elaboración del modelo conceptual hidrogeológico.....	73
<b>Figura 4.3.</b>	Metodología para la estimación del índice de vulnerabilidad GOD.....	80
<b>Figura 4.4.</b>	Árbol de decisiones para la selección de puntos de monitoreo (pozos) de la red de calidad del agua subterránea del acuífero.....	96
<b>Figura 5.1.</b>	Mapa hidrogeológico del acuífero Texcoco, año 2018.....	102
<b>Figura 5.2.</b>	Modelo conceptual hidrogeológico 3D del acuífero Texcoco.....	103
<b>Figura 5.3.</b>	Mapa del grado de confinamiento hidráulico del acuífero.....	107
<b>Figura 5.4.</b>	Mapa de ocurrencia del sustrato suprayacente.....	109

<b>Figura 5.5.</b>	Mapa de profundidad del nivel del agua subterránea del año 2018. Acuífero Texcoco.....	111
<b>Figura 5.6.</b>	Mapa de profundidad del nivel del agua subterránea de acuerdo con el método GOD. Acuífero Texcoco.....	112
<b>Figura 5.7.</b>	Mapa de vulnerabilidad a la contaminación (GOD) del acuífero Texcoco.....	114
<b>Figura 5.8.</b>	Localización de focos potenciales de contaminación en el acuífero Texcoco...	118
<b>Figura 5.9.</b>	Clasificación de focos de contaminación en el acuífero Texcoco.....	121
<b>Figura 5.10.</b>	Mapa de peligro de contaminación del agua subterránea del acuífero Texcoco.....	123
<b>Figura 5.11.</b>	Mapa de isóneas de abatimiento para el periodo 1980-2018. Acuífero Texcoco.....	126
<b>Figura 5.12.</b>	Mapa de densidad de pozos de extracción por superficie de 1 km <sup>2</sup> en el acuífero Texcoco.....	128
<b>Figura 5.13.</b>	Mapa de rangos de velocidad de hundimiento en cm/año, periodo 1999-2008. Acuífero Texcoco.....	129
<b>Figura 5.14.</b>	Restricciones (cuerpos de agua y zonas montañosas) desde la perspectiva booleana.....	131
<b>Figura 5.15.</b>	Mapas ponderados de los cuatro criterios utilizados para la definición de áreas prioritarias de control para el monitoreo de la calidad del agua subterránea.....	135
<b>Figura 5.16.</b>	Mapa resultado del análisis multicriterio.....	136
<b>Figura 5.17.</b>	Categorías de áreas prioritarias de control para el monitoreo de la calidad del agua subterránea del acuífero Texcoco.....	138
<b>Figura 5.18.</b>	Mapa de pozos de extracción clasificados de acuerdo con su uso e identificación de la malla del acuífero Texcoco.....	140
<b>Figura 5.19.</b>	Mapa de sobreposición de criterios para la elección de cuadrículas prioritarias del acuífero Texcoco.....	141
<b>Figura 5.20.</b>	Cuadrículas elegidas con pozos potenciales para el monitoreo de calidad del agua subterránea del acuífero Texcoco.....	142
<b>Figura 5.21.</b>	Pozos propuestos clasificados según su uso para la red de monitoreo de calidad del acuífero Texcoco.....	148
<b>Figura 5.22.</b>	Propuesta de red de monitoreo de calidad del agua subterránea del acuífero Texcoco.....	149

# Índice de tablas

<b>Tabla 2.1.</b>	Datos sobre la profundidad del nivel y elevación del nivel del agua subterránea del acuífero Texcoco.....	33
<b>Tabla 2.2.</b>	Valores de abatimientos del nivel piezométrico del acuífero Texcoco (periodo 1969-2018) .....	37
<b>Tabla 2.3.</b>	Volumen concesionado y usos consuntivos del agua subterránea en el acuífero Texcoco.....	40
<b>Tabla 2.4.</b>	Balance hídrico vigente del acuífero Texcoco.....	42
<b>Tabla 2.5.</b>	Población dentro de los municipios comprendidos en el acuífero Texcoco.....	50
<b>Tabla 3.1.</b>	Principales contaminantes que afectan la calidad del agua subterránea y fuentes asociadas de contaminación.....	56
<b>Tabla 3.2.</b>	Clasificación de redes de monitoreo según la escala espacial.....	59
<b>Tabla 3.3.</b>	Clasificación de los sistemas de monitoreo del agua subterránea.....	60
<b>Tabla 3.4.</b>	Índice de inconsistencia aleatorio (RI).....	64
<b>Tabla 4.1.</b>	Identificación de criterios utilizados por diversos autores en el diseño de redes de monitoreo de calidad del agua subterránea.....	74
<b>Tabla 4.2.</b>	Criterios seleccionados para el diseño de la red de monitoreo de calidad del agua subterránea del acuífero.....	78
<b>Tabla 4.3.</b>	Clasificación de fuentes puntuales de contaminación.....	85
<b>Tabla 4.4.</b>	Clasificación de fuentes difusas de contaminación.....	85
<b>Tabla 4.5.</b>	Matriz para la clasificación del peligro a la contaminación del agua subterránea.....	87
<b>Tabla 4.6.</b>	Escala de Saaty (1990) para la ponderación de criterios.....	90
<b>Tabla 4.7.</b>	Índice inconsistencia aleatorio en el análisis multicriterio (RI).....	91
<b>Tabla 4.8.</b>	Lista de parámetros sugeridos que se requieren para una red de monitoreo de calidad del agua subterránea.....	98
<b>Tabla 5.1.</b>	Puntajes asignados al sustrato suprayacente (O) del acuífero Texcoco.....	108
<b>Tabla 5.2.</b>	Área de cada grado de vulnerabilidad y porcentaje que ocupa con respecto al área total del acuífero.....	113
<b>Tabla 5.3.</b>	Clasificación de los focos de contaminación.....	120
<b>Tabla 5.4.</b>	Área de cada grado de peligrosidad y porcentaje que ocupa con respecto al área total del acuífero.....	124
<b>Tabla 5.5.</b>	Matriz de comparación por pares de los criterios utilizados para el proceso AHP.....	132
<b>Tabla 5.6.</b>	Matriz de pesos normalizados para cada criterio.....	133
<b>Tabla 5.7.</b>	Valores resultantes del vector sumatorio de pesos.....	133
<b>Tabla 5.8.</b>	Valores resultantes del cálculo del vector de consistencia y $\lambda_{\max}$ .....	133
<b>Tabla 5.9.</b>	Valores resultantes de CI, RI Y CR.....	134

<b>Tabla 5.10.</b>	Pesos asignados y normalizados de las diferentes características de los criterios para la definición de áreas prioritarias de control.....	134
<b>Tabla 5.11.</b>	Pozos propuestos como línea base de monitoreo.....	143
<b>Tabla 5.12.</b>	Pozos propuestos como puntos de monitoreo en áreas de prioridad alta.....	144
<b>Tabla 5.13.</b>	Pozos propuestos como puntos de monitoreo en áreas de prioridad media.....	146

# Capítulo 1. Introducción

---



# Introducción

El agua subterránea constituye la reserva predominante de agua dulce en nuestro planeta, ya que representa aproximadamente el 97 % de las reservas totales, pero su sostenibilidad a largo plazo depende del control de la extracción, de la gestión de la recarga y de la protección de su calidad (IGRAC, 2019).

El objetivo de una buena gestión del agua subterránea no sólo radica en el consumo y la extracción, sino también en el monitoreo continuo de su calidad incluyendo los fenómenos de contaminación natural y antropogénica, los cuales requieren delimitación para evitar la pérdida de los recursos hídricos (Taheri, et al., 2020). Diferentes actividades antropogénicas como la minería, la aplicación de agroquímicos, las actividades industriales, la descarga de aguas residuales y la extracción excesiva de agua pueden, potencialmente, contaminar el agua subterránea y volverla insegura para su uso, si no tiene un tratamiento previo (Daanoba Sunkari & Bauchi Danladi, 2016; Li, et al., 2015; Yuce, et al., 2006). Por este motivo, se requiere del diseño de redes de monitoreo de calidad del agua subterránea que permitan la evaluación cuantitativa de los problemas de contaminación y justifiquen el uso de los recursos económicos disponibles para un monitoreo efectivo.

En México, el agua subterránea es una fuente primordial de abastecimiento para ciudades y zonas rurales, ya que más del 65 % del volumen total de agua que estas urbes requieren para el desarrollo de sus actividades diarias provienen de los acuíferos (Barranco Salazar, 2018). En particular, el acuífero Texcoco es uno de los más explotados en la Cuenca de del Valle de México por la gran cantidad de aprovechamientos subterráneos, de los cuales depende la población asentada en el acuífero. Este acuífero presenta un déficit de 111.87 Mm<sup>3</sup>/año, una disminución continua del nivel del agua subterránea a una velocidad promedio de 1.2 m/año, y diversos efectos negativos asociados a la sobreexplotación que podrían poner en peligro la calidad del agua (CONAGUA, 2018; DOF, 2019).

La problemática de la calidad está relacionada, fundamentalmente, con la proliferación de innumerables focos de contaminación como: la actividad agrícola, saneamiento in situ, industria, minería, depósitos de basura o rellenos sanitarios, lagunas de estabilización de aguas residuales, ríos y arroyos, entre otros, que, a su vez, generan un peligro potencial de contaminación del agua subterránea (Foster, et al., 2006).

La presente investigación pretende diseñar una red de monitoreo de calidad que tenga una cobertura espacial útil y una confiabilidad temporal, con ayuda del análisis multicriterio en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Dado que resulta complicado incluir información sobre los diversos criterios en el diseño óptimo de redes de monitoreo, herramientas como los SIG se emplean para realizar los análisis multicriterio (Esquivel Martínez, et al., 2015) y ayudan a facilitar el proceso de evaluación de los criterios definidos para el cumplimiento del objetivo específico.

Todo ello, tiene la finalidad de establecer un monitoreo que proporcione información de la calidad del agua subterránea (físicoquímica y bacteriológica) y del impacto que está sufriendo el acuífero. La información obtenida con esta red servirá para que los tomadores de decisiones puedan establecer y mejorar las estrategias de protección, conservación y aprovechamiento del recurso hídrico.

# Justificación

Tener acceso al agua en cantidad y calidad es una preocupación a nivel mundial, ya que es impulsora del desarrollo productivo de cualquier sociedad (Rivett, et al., 2018). Las variaciones, tanto en cantidad como en calidad, son procesos que toman largos periodos, sin embargo, en lapsos más o menos extensos, cambios puntuales que no tienen un adecuado monitoreo pueden alcanzar áreas significativas sin que se detecten impactos sobre los acuíferos (DGA, 2019).

Regularmente se carece de datos cuantitativos sobre los recursos de agua subterránea en los países en desarrollo, especialmente datos sobre la calidad del agua subterránea que son vitales para advertir sobre problemas de contaminación (Foster & Chilton, 2003; MacDonald, et al., 2012). Es evidente, que el problema de la calidad del agua subterránea es tan importante como la falta de cantidad de agua para satisfacer las necesidades humanas y ambientales.

En este sentido, el monitoreo de la calidad del agua subterránea es una parte fundamental en la gestión del agua en todos los acuíferos (Taheri, et al., 2020). Es necesario medir las variaciones espaciales y temporales de los parámetros relacionados con la calidad del agua subterránea para contar con los datos necesarios y lograr su correcta gestión. Debe destacarse que, estas mediciones, se hacen excepcionalmente importantes en aquellos acuíferos sometidos a “explotación intensiva” y con un aumento significativo en la demanda del agua subterránea (Esquivel Martínez, 2015). Tal es el caso del acuífero Texcoco, uno de los acuíferos de la Cuenca del Valle de México con graves problemas de agotamiento.

Los estudios sobre la calidad del agua subterránea de este acuífero son escasos y aislados a pesar de que existen numerosos focos de contaminación (Prado Hernández, et al., 2017), lo que hace necesario realizar este tipo de estudios. Por otro lado, la sobreexplotación del acuífero ha ocasionado que los gradientes hidráulicos se inviertan y las salmueras existentes en la zona del Ex-Lago de Texcoco (Carranza Edwards, 2018) alcancen los horizontes más superficiales del agua dulce, incrementando así el riesgo de contaminación. Otro punto para

resaltar es que, actualmente, el acuífero no cuenta con una red de monitoreo de calidad propiamente definida para evaluar los impactos que está sufriendo. Con la finalidad de adquirir información espacio-temporal suficiente y adecuada sobre la evolución espacial y temporal de calidad del agua subterránea, la presente investigación pretende diseñar una red de monitoreo de calidad a través de la aplicación de un análisis multicriterio con la ayuda del SIG, la cual facilitaría el manejo sostenible del acuífero.

# Hipótesis

La identificación de áreas prioritarias de control de calidad del agua subterránea mediante el análisis multicriterio en el entorno SIG permitirá el diseño espacial óptimo de la red de monitoreo de calidad en el acuífero Texcoco.

# Objetivos

## Objetivo general

Diseñar, con base en áreas prioritarias de control, una red de monitoreo de calidad del agua subterránea en el acuífero Texcoco mediante el análisis multicriterio en un entorno SIG, lo que facilitará la adquisición de información espacio-temporal suficiente y adecuada para el manejo sostenible del acuífero.

## Objetivos específicos

- I. Recopilar, analizar y sintetizar la información disponible sobre la climatología, geología, hidrología, usos de suelo, características hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero, usos del agua y las problemáticas en torno al acuífero para conformar una base de datos y la cartografía primaria.
- II. Desarrollar un modelo conceptual hidrogeológico del acuífero, mediante la integración de la información disponible, para conocer con mayor detalle las características hidrogeológicas que se tomarán en cuenta en el diseño de la red de monitoreo.
- III. Identificar, seleccionar y generar los criterios a emplear en el diseño de la red de monitoreo de calidad del agua subterránea.
- IV. Elaborar una propuesta de áreas prioritarias de control, mediante el análisis multicriterio en un entorno SIG, para el diseño de la red de monitoreo de calidad del agua subterránea.

- V. Integrar y analizar, mediante los Sistemas de Información Geográfica, la información recopilada y generada en la investigación para el establecimiento de la red de monitoreo de calidad del agua subterránea en el acuífero.

# Capítulo 2. Área de estudio

---

## 2.1. Localización y características generales

El acuífero Texcoco, con clave 1507, se localiza en la porción central del país, en la zona este de la Cuenca del Valle de México (CVM), y en la porción centro-oriental del Estado de México, abarcando una superficie aproximada de 934 km<sup>2</sup>.

Limita al norte con el acuífero Cuautitlán-Pachuca, al este con el acuífero Soltepec, al sur y sureste con el acuífero Chalco-Amecameca, y al oeste con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Figura 2.1). Administrativamente, corresponde a la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México (DOF, 2019).

Los municipios que se localizan dentro de los límites del acuífero Texcoco son: Chicoloapan, Chimalhuacán, Chiautla, Papalotla, Texcoco, Chiconcuac, Atenco, Ixtapaluca, Nezahualcóyotl, La Paz, Tepetlaoxtoc, así como pequeñas porciones de los municipios Acolman, Ecatepec de Morelos y Tezoyuca, todos ellos del Estado de México.

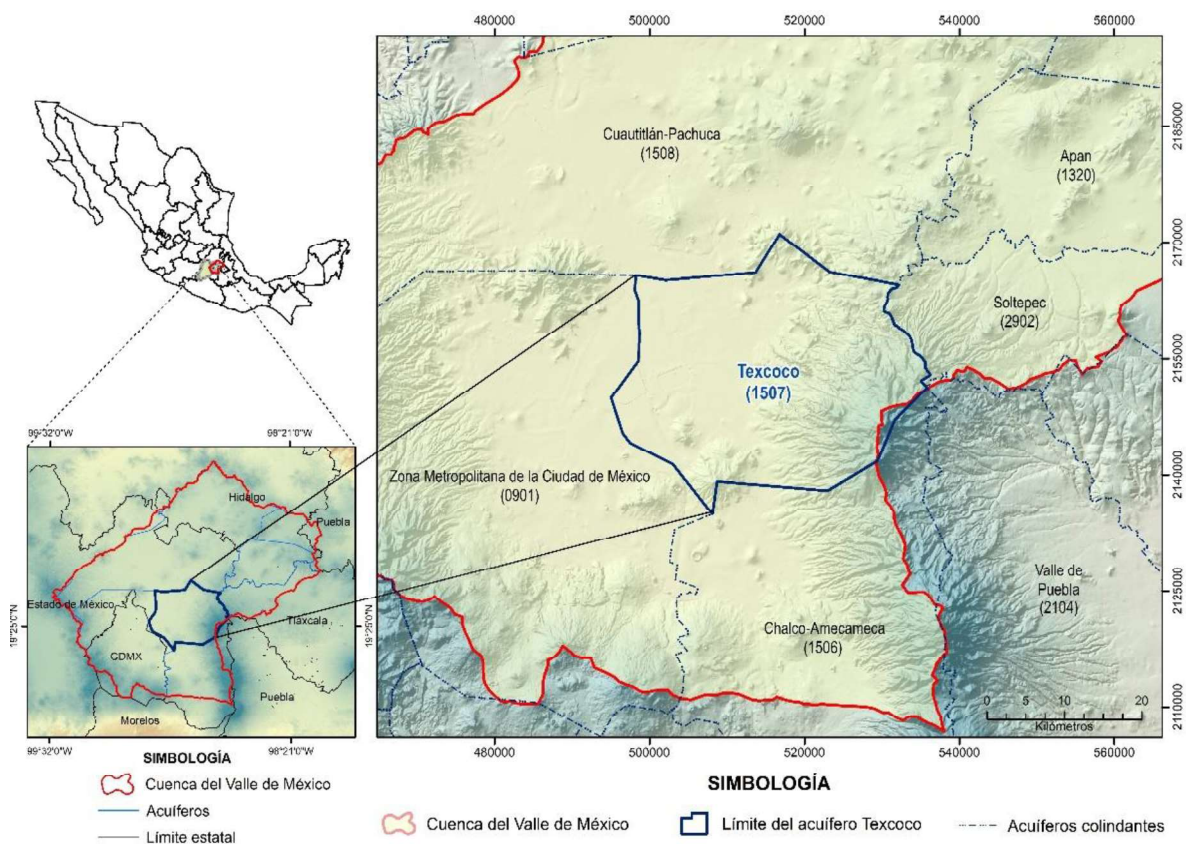


Figura 2.1. Mapa de localización del área de estudio. Acuífero Texcoco (Elaboración propia con datos de CONAGUA, 2015)

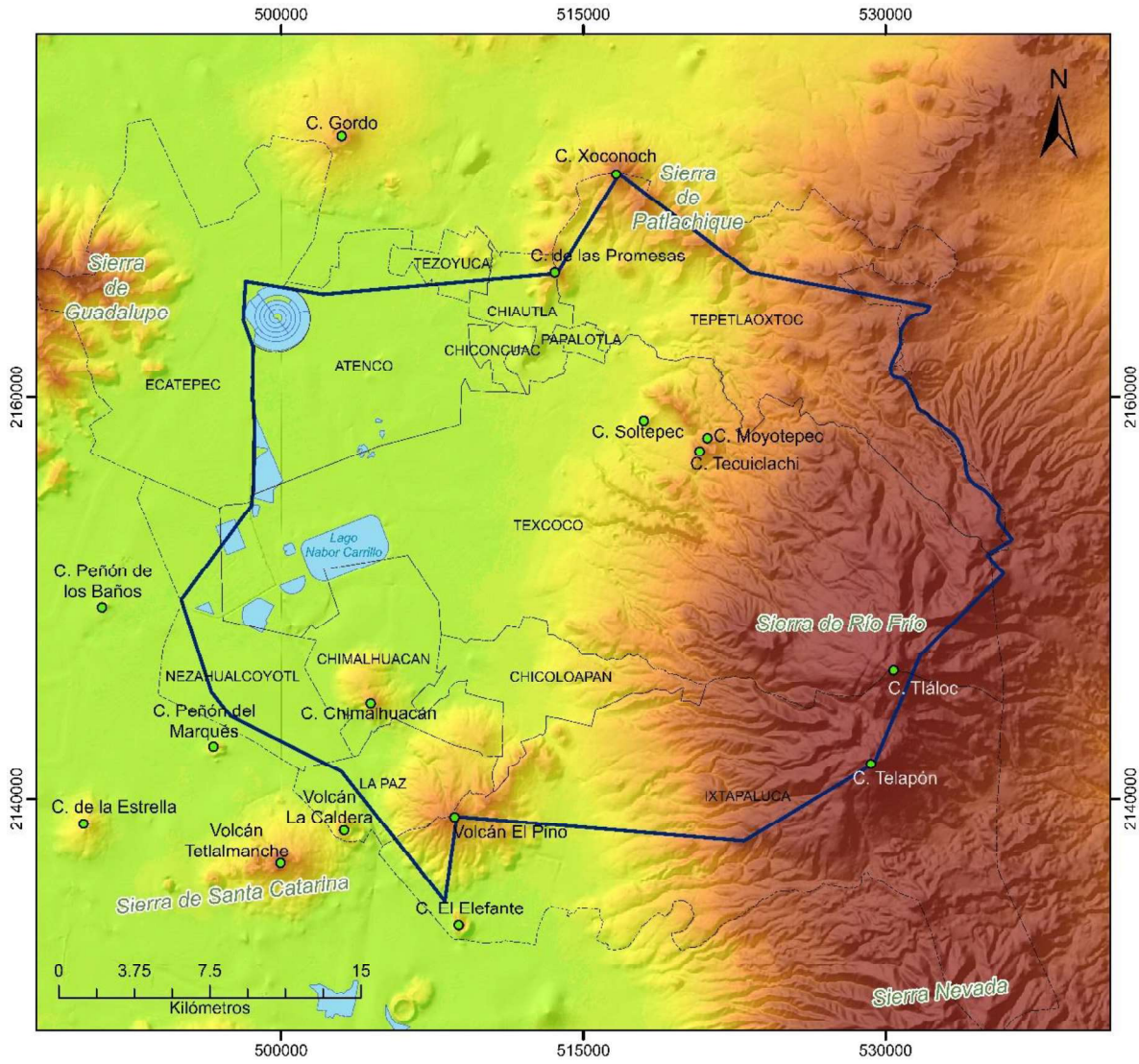


El Valle de México se ubica en la parte central de la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico y en la porción central de la Subprovincia Fisiográfica de los Lagos y Volcanes de Anáhuac (CONAGUA, 2018; Suárez Romero, 2019). Debido a su ubicación geográfica, el Valle de México, donde se localiza el acuífero Texcoco, cuenta con dos elementos geomorfológicos principales: las zonas altas que bordean el valle, constituidas por sierras, cerros, laderas y lomeríos; entre las que destacan la Sierra Nevada que se localiza al este, la Sierra de Las Cruces al oeste y la Sierra Chichinautzin hacia el sur, y las zonas planas que corresponden a una altiplanicie que consta de depresiones lacustres en proceso de desecación y pequeñas elevaciones topográficas aisladas.

Las elevaciones cercanas al área de estudio y que influyeron en su evolución geomorfológica son: La Sierra de Río Frío al este, La Sierra de Guadalupe al oeste, los cerros El Pino, Chimalhuacán, y Peñón del Marqués al sur y el cerro Peñón de los Baños al suroeste (Figura 2.2).

En cuanto al clima, predomina el seco templado o árido templado con régimen de lluvias en verano (BS1 kw(w)(i')), mientras que en las estribaciones de las sierras de mayor altitud se presenta el clima semifrío subhúmedo, con lluvias en verano mientras que en las partes más altas el clima es frío. La precipitación y temperatura media anual es de 750 mm y 25 °C, respectivamente. Para las zonas altas de las sierras la temperatura media anual es de 10 °C.

La temporada de lluvias comprende de mayo a septiembre teniendo los máximos valores de precipitación en julio y agosto, reportando estos meses valores de hasta 157 mm. La temporada seca corresponde a los meses de noviembre a abril, con escasas precipitaciones (Mendoza Archundia, 2012).



**SIMBOLOGÍA**

- Límite municipal
  - ▭ Límite del acuífero Texcoco
  - Cuerpos de agua
- Elevación (msnm)
- 4136
  - 2262

Figura 2.2. Mapa hipsométrico del acuífero Texcoco (INEGI, 2018)

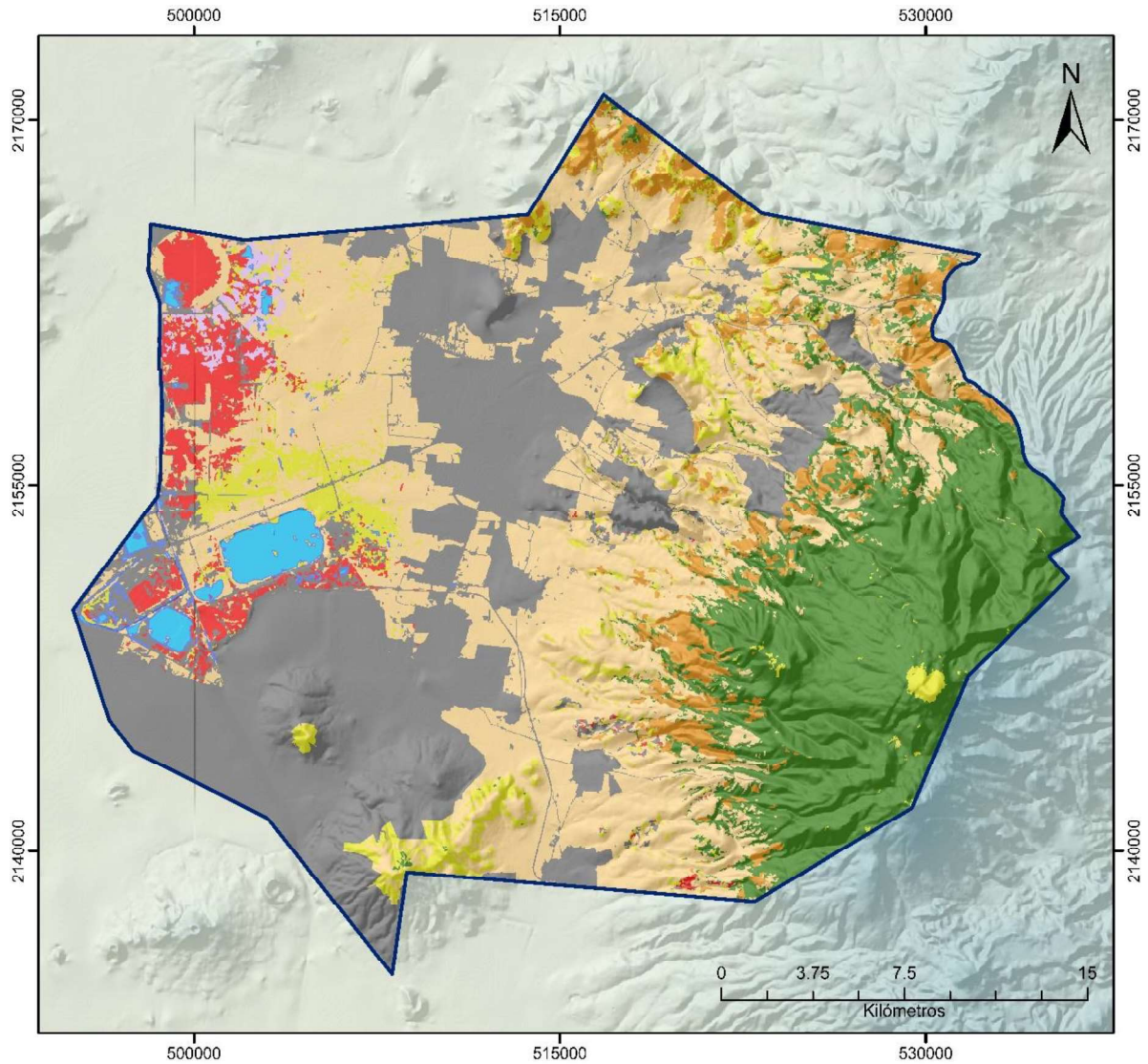
## 2.2. Uso del suelo y cobertura vegetal

Los usos del suelo y la cobertura vegetal determinan el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, afectan directamente a su biodiversidad, contribuyen a los cambios climáticos locales y globales, y son las fuentes primarias de la degradación de los suelos (Trucíos-Caciano, et al., 2011). La mayor parte de los cambios que ocurren en los ecosistemas terrestres se deben a la modificación de la cobertura vegetal, la degradación del suelo y la intensificación en el uso del suelo (Díaz Caravantes, et al., 2014).

En el área de estudio, se observa que más del 65 % de su superficie corresponde a zonas de agricultura destacando la porción occidental por ser zonas agrícolas por riego, mientras que la porción oriental, a los pies de las zonas topográficamente altas, se presentan zonas temporales; y básicamente toda la porción de la zona serrana pertenece a bosques de pino y encino (Figura 2.3).










Los pastizales se distribuyen en los taludes bajos de las serranías (hacia el sur bordeando el cerro El Pino en Ixtapaluca y Los Reyes La Paz), donde destaca como especie original *Hilaria cenchroides*. Hoy en día este pastizal se encuentra poco extendido a causa de disturbios antropogénicos que lo han reemplazado por praderas inducidas de origen secundario. Los pastizales halófilos se localizan al norte del Lago Nabor Carrillo, cubriendo una pequeña porción de suelo, hasta alcanzar la zona del evaporador solar “El Caracol”. El pastizal halófilo es una comunidad baja y densa que prolifera sobre los suelos salinos, sódicos y mal drenados del fondo de los antiguos vasos lacustres de Zumpango y Texcoco (CONAGUA-UACH, 2010).

Las zonas de matorral se localizan distribuidas en la porción oriente del acuífero, en las laderas medias y bajas de los principales elementos serranos.



**SIMBOLOGÍA**

**Uso de suelo y cobertura vegetal**

- |   |   |
|---|---|
|  Asentamientos humanos                   |  Humedal                     |
|  Bosque de coníferas templado o subpolar |  Suelo agrícola              |
|  Matorral templado o subpolar            |  Desprovisto de vegetación   |
|  Pastizal templado o subpolar            |  Cuerpos de agua             |
|   |  Límite del acuífero Texcoco |

**Figura 2.3.** Mapa del uso de suelo y cobertura vegetal del acuífero Texcoco (Elaboración propia con base en una imagen satelital LANSAT-8, 2018)

Los asentamientos humanos se localizan principalmente en la porción suroccidental y hacia el nororiente del acuífero. Así mismo, cabe señalar la presencia de cuerpos de agua, como son los lagos artificiales localizados al occidente de la ciudad de Texcoco, destacando el “Lago Nabor Carrillo” cuyo objetivo es almacenar las aguas procesadas en embalses y las procedentes de los escurrimientos de los ríos del oriente de la cuenca. En cuanto a los humedales, ocupan pequeñas porciones en la planicie del Ex-Lago de Texcoco.

La zona desprovista de vegetación o suelo desnudo se localiza al norte de la planicie, cerca al evaporador solar “El Caracol” y en menor porción al sur del Lago Nabor Carrillo. En estos suelos desnudos se aprecian residuos salinos en la superficie productos de la extracción de sales de sodio en el pasado (Rodríguez Barrón, 2010).

### **2.3. Geología**

#### **2.3.1. Marco general**

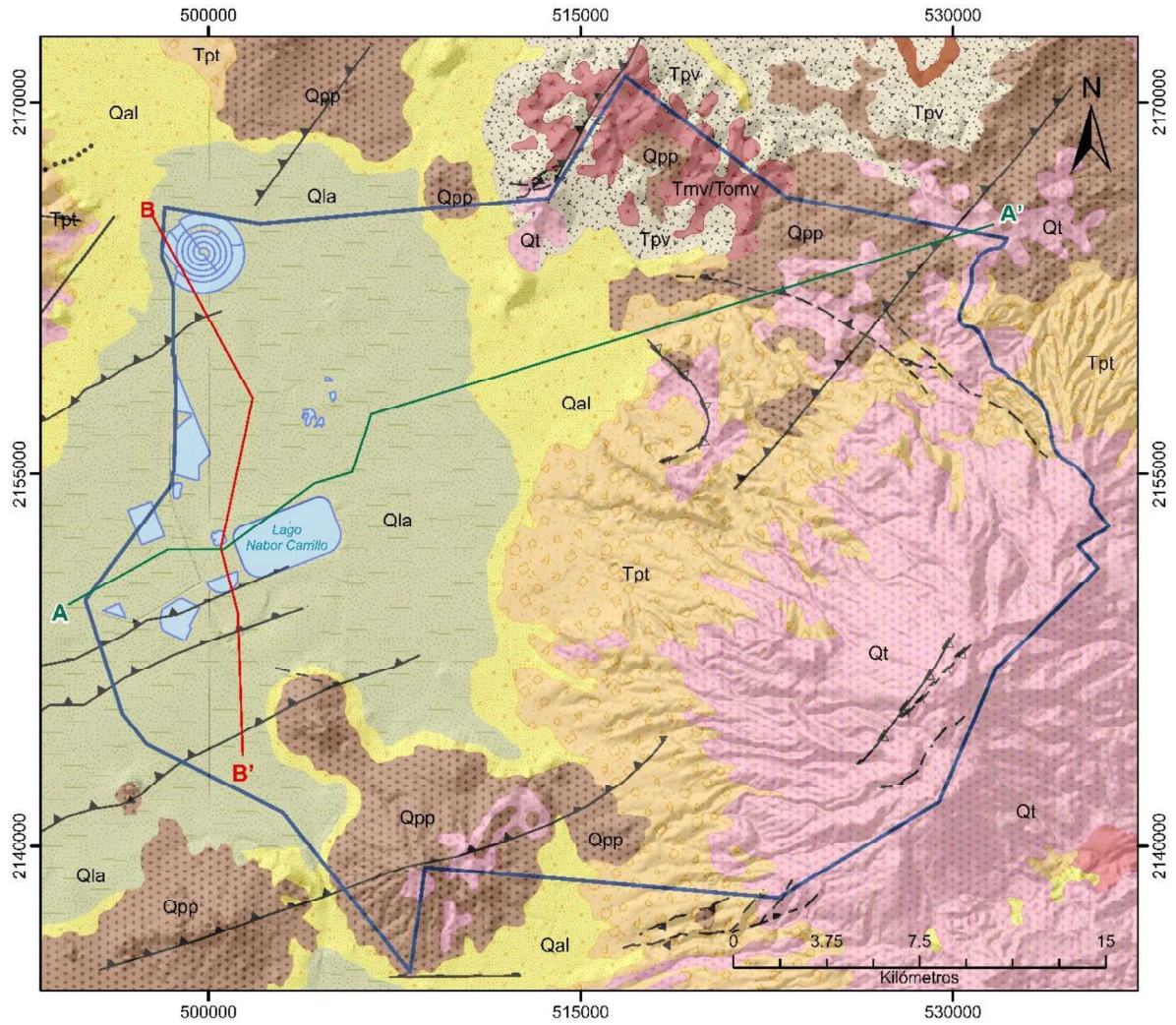
La geología del acuífero está ligada al desarrollo y evolución de la Cuenca del Valle de México (CVM), de la cual forma parte y data del Eoceno al Cuaternario. Las rocas que la constituyen deben su origen a procesos volcánicos y tectónicos, evidenciados por la presencia de importantes espesores de lava andesítica y basáltica, características de las Sierras de las Cruces, Nevada y Chichinautzin.

Existen afloramientos de tobas, brechas y complejos volcánicos del Mioceno en porciones de la base de la Sierra de Guadalupe y en cerros como Coatepec y Gordo, cuya composición varía de andesita a dacita. Durante el final del Mioceno se inició la formación de las denominadas sierras mayores: Sierra de Río Frío y Sierra Nevada (Arce, et al., 2019).

Una serie de procesos estructurales desarrollados durante el Plioceno Tardío y Cuaternario, dieron origen a la formación de amplias fosas tectónicas definidas como; Tláloc-Apan y Cuauhtepic, situadas en la Sierra de Guadalupe (García-Palomo, et al., 2018; Arce, et al., 2019; CONAGUA, 2018). Estas fosas están limitadas por fracturamiento y fallas que provienen del poniente y representan un gran arco cóncavo hacia el sur, que afecta a la Sierra Nevada y forma la fosa en el flanco poniente del Cerro Tláloc.

Las grandes fosas fueron rellenadas por material clástico. Al oriente hacia el ExLago de Texcoco, existen depósitos aluviales de granulometría gruesa cerca de las sierras y que disminuye a medida que se acerca hacia la zona limítrofe del vaso lacustre, los cuales están constituidos por depósitos clásticos plio-cuaternarios subyacidos por material aluvial y lahares retrabajados. La obstrucción del drenaje de la Cuenca de México, causada por la intensa actividad volcánica que formó la Sierra Chichinautzin, dio origen a los depósitos lacustres (González Torres, et al., 2015). Durante el Pleistoceno y Holoceno continuo el vulcanismo principalmente de composición andesítico-basáltico, reconocido en los cerros Chimalhuacán, Gordo y El Pino.

La distribución superficial de las unidades geológicas presentes en el acuífero Texcoco, se muestran en la Figura 2.4. Las rocas de origen volcánico se localizan en las partes altas, constituidas por basaltos y andesitas principalmente (Qt, Qpp, Tpv, Tmv, Tomv); los depósitos aluviales y lahares, intercalados con materiales piroclásticos, ceniza, grava y arenas, se encuentran bordeando las sierras (Tpt); materiales producto de la erosión de rocas provenientes de la actividad volcánica contemporánea se encuentran en la parte inferior de las sierras mayores, constituidos principalmente por arenas, gravas, arcillas, limos (Qal), y finalmente los depósitos lacustres localizados en el valle (Qla).



**SIMBOLOGÍA**

Unidades geológicas				
Pleistoceno-Holoceno	Qla	Arcillas lacustres	—	Fracturas
	Qal	Depósitos aluviales	▲	Falla normal
	Qt	Derrames andesíticos y dacíticos	▲	Falla inversa
	Qpp	Basaltos, andesitas o rocas dacito-riolíticas	-▲-	Falla normal inferida
	Tpt	Depósitos aluviales y lahares	A—A'	Sección geológica línea A - A'
Plioceno	Tpv	Depósitos volcánicos (tobas y rocas andesita-dacita)	B—B'	Sección geológica línea B - B'
Mioceno	Tmv/Tomv	Rocas volcánicas ácidas (dacita)	□	Límite del acuífero Texcoco
			■	Cuerpos de agua

Figura 2.4. Mapa geológico del acuífero Texcoco y localización de las secciones geológicas (CONAGUA, 2018)

### 2.3.2. Unidades litoestratigráficas

La estratigrafía del subsuelo de la CVM se ha integrado a partir de la información de varios pozos profundos y ha sido descrita en diferentes estudios (Fries, Jr., 1960; Vázquez Sánchez & Jaimes Palomera, 1989; González Torres, et al., 2015; Arce, et al., 2019). Los seis pozos profundos perforados en la CVM cubren un rango de profundidad que alcanza desde 2,008 a 3,200 m (Figura 2.5); uno de estos pozos es el Texcoco-1 que se localiza dentro de los límites del acuífero.

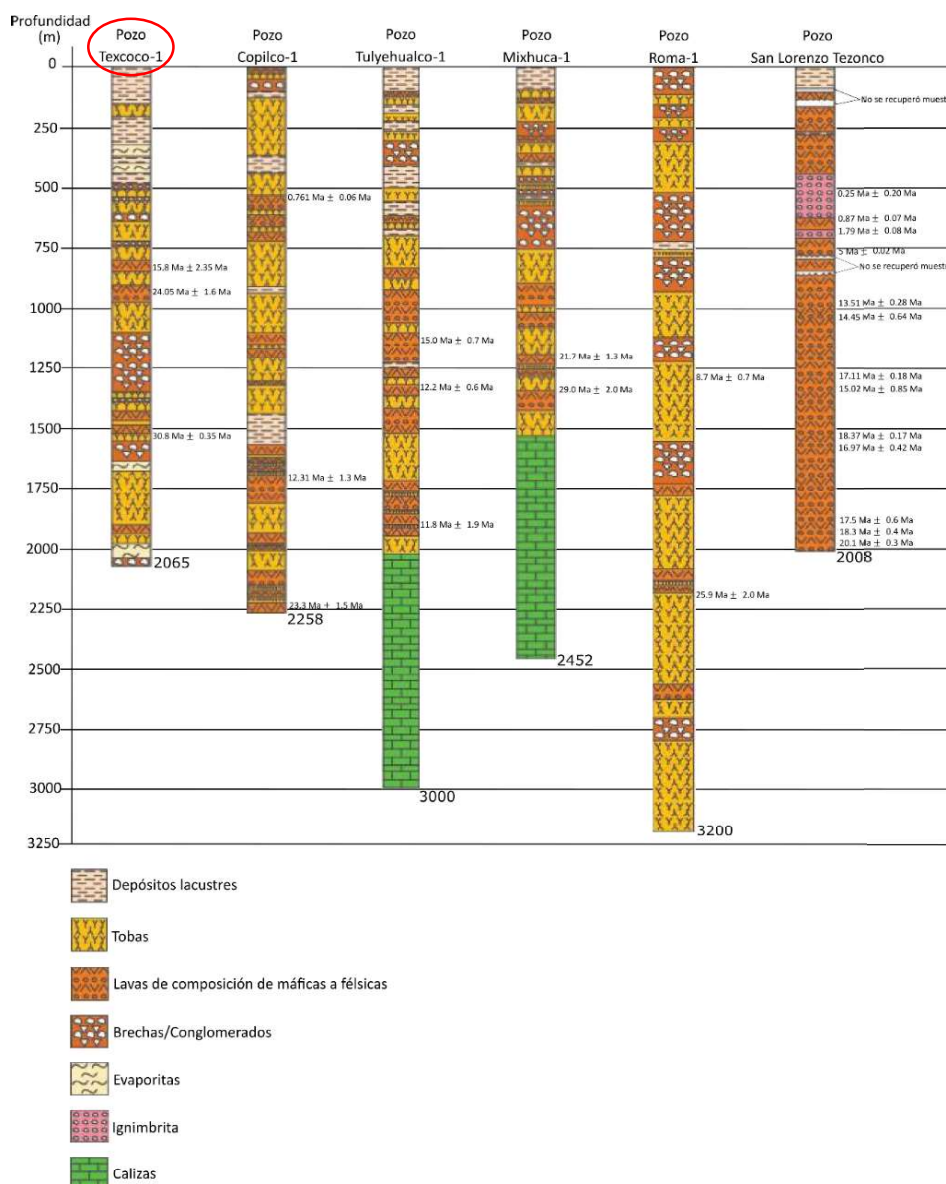


Figura 2.5. Columnas estratigráficas de los de los pozos profundos perforados en la Cuenca de México (Tomada de González Torres, et al., 2015)



A continuación, se hace una descripción sintetizada y en orden cronológico de las unidades litoestratigráficas que cubren el área del acuífero Texcoco, misma que forma parte integral de la formación de la CVM.

### Terciario

- Rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (Tomv)

Constituyen una secuencia de tobas líticas, cristalinas y vítreas, brechas tobáceas y aglomerados; que se encuentran interestratificadas y/o cubiertas en su parte superior por derrames lávicos. Los flujos lávicos son de grano fino a medio y algunos de ellos tienen buena estructura fluidal y xenolitos serpentinizados. Las rocas de esta formación afloran en la Sierra de Xochitepec y en los cerros Picacho y Pupilo del Diablo y tienen espesores variables entre los 390 a 1,750 m. Estas secuencias volcánicas contienen capas de clásticos aluviales de espesor promedio de 6 m que indican tiempo de reposo en la actividad volcánica.

En el subsuelo de la cuenca, estas rocas cubren discordantemente a las unidades cretácicas y al Grupo Balsas subyacente, además de encontrarse cubiertas por rocas del Mioceno Medio y Tardío y en algunas localidades por formaciones del Plio-Cuaternario (Vázquez Sánchez & Jaimes Palomera, 1989).

- Rocas Volcánicas del Mioceno Medio-Tardío (Tmv)

Están constituidas por secuencias de tobas, brechas volcánicas y lavas, que se han identificado como andesitas de lamprobolita o augita, andesitas de hiperstena, dacitas de textura porfirítica-afanítica, tobas cristalinas andesíticas de textura clástica. Estas rocas difieren en composición litológica y posición estratigráfica con respecto a las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano.

Sus afloramientos se distribuyen principalmente en los cerros El Elefante, El Judío, Los Remedios, El Peñón de los Baños, la base de la Sierra Guadalupe, la base de la Sierra de las Cruces, El Cerro Patlachique y en algunos otros afloramientos al norte de Texcoco (Vázquez Sánchez & Jaimes Palomera, 1989). Estas unidades se encuentran sobreyacidas

discordantemente por unidades pliocénicas y algunas unidades de edad Cuaternario. De acuerdo con los fechamientos realizados a esta unidad se le data con una edad desde el Mioceno Medio al Mioceno Tardío (Mendoza Archundia, 2012).

En el pozo profundo Texcoco-1, se encontró a esta formación a profundidades entre los 814 y 920 m, en el Pozo Roma-1 a profundidades entre 633 y 60 m, en el Pozo Mixhiuca-1 entre los 880 y 1,190 m, en el Pozo Copilco-1 a profundidades entre 1,180 y 1,580 m y por último en el Pozo Tulyehualco a profundidades entre 930 y 1,740 m.

- **Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv)**

Son rocas extrusivas que representan un segundo periodo magmático. Afloran en los flancos de las Sierras Las Cruces, Zempoala y Río Frío, y en cerros aislados en el resto de la cuenca, también coronan las Sierras de Guadalupe y Tepotzotlán; sobreyacen discordantemente a rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno y se encuentran cubiertas por rocas volcánicas del Plioceno Tardío y Cuaternario (Vázquez Sánchez & Jaimes Palomera, 1989; Arce, et al., 2019).

Vázquez y Jaimes (1989) definen a esta formación como una relación interdigitada con depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno cuya composición varía de andesítica a dacítica. Las secuencias están compuestas por tobas cristalinas, vítreas, líticas y pumíticas, tanto de flujo piroclástico como de “surge” piroclástico y se encuentran intercaladas por derrames lávicos y autobrechados con brechas de flujo.

- **Formación Tarango (Tpt)**

Está conformada por una intercalación de tobas, brechas volcánicas, depósitos de lahar y depósitos fluviales provenientes de la erosión de los complejos del Terciario Medio y Superior. Las tobas se encuentran ligeramente soldadas y actualmente están sepultadas cubriendo los pies de todas las elevaciones del Terciario Medio y Superior de la Sierra Nevada, Sierra de Guadalupe y la Sierra de las Cruces con una edad Plioceno-Pleistoceno (Mooser, 1961). Las series piroclásticas están formadas a partir fragmentos angulares grandes y pequeños de andesita y pómez, ligeramente cementados en una matriz de vidrio

volcánico. Se estima que los depósitos tienen un espesor promedio de entre 300 y 400 m (Suárez Romero, 2019).

### Cuaternario

- Formación el Pino (Qpp)

Constituida por derrames lávicos con intercalaciones de ceniza, lapilli y escoria de caída de composición basáltica, andesítica y traquítica (Vázquez Sánchez & Jaimes Palomera, 1989). Se asocia a las rocas provenientes de coladas lávicas en bloques de composición máfica, predominantemente andesita basáltica de olivino, con vesículas alineadas y textura fluidal que forman los cerros La Estrella, El Pino, Chimalhuacán, y Chiconautla. Su máximo espesor es del orden de los 750 m. Esta formación cubre discordantemente a las unidades volcánicas del Oligoceno, Mioceno y Plioceno y se le asigna una edad de entre 0.7 y 0.9 Ma (Vázquez Sánchez & Jaimes Palomera, 1989).

- Formación Tláloc (Qt)

Caracterizada por coladas lávicas que forman parte de la Sierra Río Frío. La composición de esta formación es andesítica latítica y dacítica; consta de varias sucesiones caracterizadas en su base por pómez y líticos accidentales angulosos, tamaño lapilli, de aproximadamente un metro de espesor. Esta formación cubre discordantemente rocas volcánicas del Mioceno Medio-Tardío y Plioceno Temprano.

El pozo profundo PP-1 Texcoco (SHCP, 1969) no cortó esta unidad sino más bien se encontró el aluvión con intercalación de piroclastos, el cual es equivalente a la Formación Tláloc. Debido a esto Vázquez y Jaimes (1989) infieren una interdigitación entre ambos depósitos; se propone una edad Pleistocénica de entre 0.7 y 0.6 Ma y un espesor máximo en el centro de la Sierra de 1,800 m, el cual se acuña hacia los alrededores (López Martínez, 2019).

- Depósitos aluviales (Qal)

La obstrucción del drenaje en la CVM causó una acumulación de depósitos de tipo clástico fluvial relacionados con periodos glaciares y postglaciares del Pleistoceno-Holoceno. Estos depósitos están compuestos por material poco consolidado con fragmentos de tamaño

grava, arena, limos y arcilla, se encuentran interestratificados con tobas de grano fino y lapílicas, derrames lávicos de tipo basáltico y andesítico, conglomerados y brechas. En la parte superior se encuentra interdigitado con los depósitos lacustres del Cuaternario. Los depósitos afloran formando llanuras aluviales en las orillas de la CVM. Vázquez y Jaimes (1989) proponen un tiempo de formación de Pleistoceno Tardío.

En los pozos Mixhuca-1, Texcoco-1, Ramal Texcoco 1 y Ramal Texcoco 13 (CONAGUA, 2006) estos depósitos fueron cortados a las profundidades de 167-500, 80-360, 44 - >200 y 48-328 metros respectivamente (Unda López, 2016).

- Depósitos lacustres (Q<sub>la</sub>)

Estos depósitos formaron una gran altiplanicie en un ambiente lacustre que se extiende desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta el Cerro de Chapultepec. Están compuestos de arcillas bentónicas y montmorilloníticas, con carbonato de calcio, diatomeas, ostrácodos e interestratificaciones de ceniza y pómez. Los clastos de tipo volcánico son producto de las erupciones del volcán Popocatepetl y de la Sierra de Chichinautzin. Se encuentran también interdigitados con la Formación Chichinautzin y con los Depósitos Aluviales, tienen una edad de formación de Pleistoceno Tardío.

De acuerdo con Vázquez y Jaimes (1989), estos depósitos tienen un espesor variable de entre 3 y 167 m. En la zona de Texcoco, de acuerdo con la columna litológica del pozo profundo Texcoco-1, el espesor de esta capa es de alrededor de 80 m y en el Pozo Mixhuca-1 se cortó su base a una profundidad de 167 m (Unda López, 2016).

En la sección geológica A - A' con rumbo general W-E, que parte de la Ciudad de México, pasa por El Peñón de los Baños, cruza la planicie del Ex-Lago de Texcoco y termina en las estribaciones de la Sierra Río Frío (CONAGUA, 2009) y en la sección B - B', se muestran las unidades litoestratigráficas que conforman al acuífero de Texcoco. A grandes rasgos, se ponen en evidencia tres grandes grupos de rocas; volcánicas del Terciario, vulcanitas propias del cierre de la cuenca; y los depósitos de materiales aluviales y lacustres depositados en el Cuaternario (Figura 2.6 y 2.7).

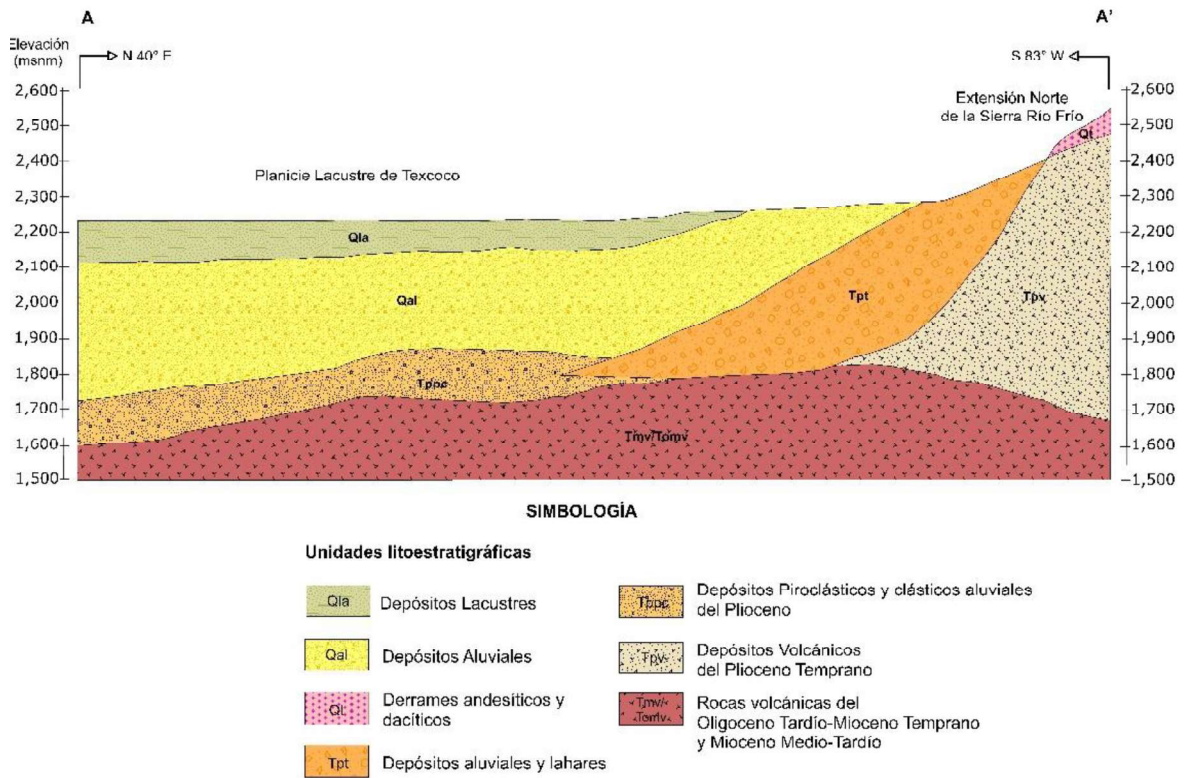


Figura 2.6. Sección geológica A-A' del acuífero Texcoco (Tomada de Suárez Romero, 2019)

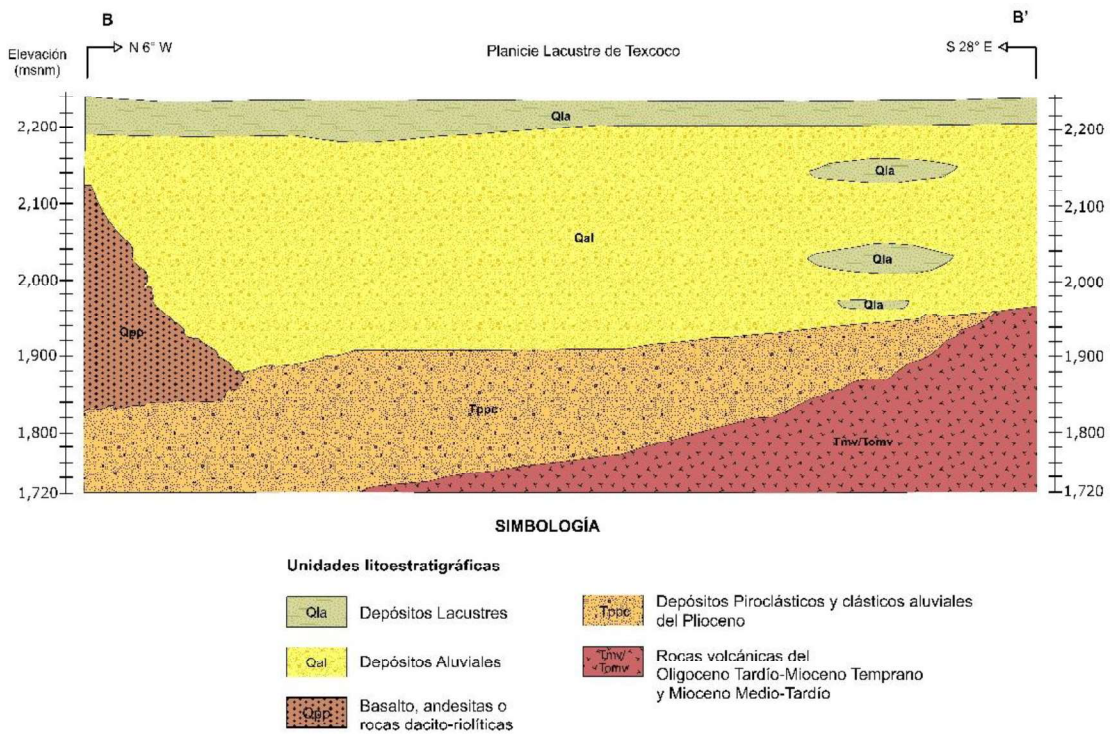


Figura 2.7. Sección geológica B-B' del acuífero Texcoco (Tomada de Suárez Romero, 2019)

La perforación del pozo Texcoco-1, que se localiza en el centro del ExLago de Texcoco (SHCP, 1969), permitió conocer por primera vez una columna estratigráfica continua de la CVM hasta una profundidad de 2,065 m, siendo la que ha aportado mayor conocimiento a profundidad en la zona del Valle de Texcoco (CONAGUA, 2015; González Torres, et al., 2015; Arce, et al., 2019) (Figura 2.5). La columna estratigráfica de este pozo está constituida por: capas de arcilla, limos y arenas, de 0 a 180 m; y de 180 a 505 m, arcillas, lutitas, arcillas arenosas, arenas, areniscas y calizas lacustres; de 505 a 1,437 m, tobas y rocas ígneas, brechas y conglomerados; de 1,437 a 1,980 m, tobas líticas, rocas ígneas y arenas; de 1,980 a 2,045 m, anhidritas arcillosas y margas; de 2,045 a 2,065 m arcillas margas y conglomerados calcáreos. Los materiales están saturados de agua y los registros eléctricos muestran acuíferos de gran espesor (CONAGUA, 2015).

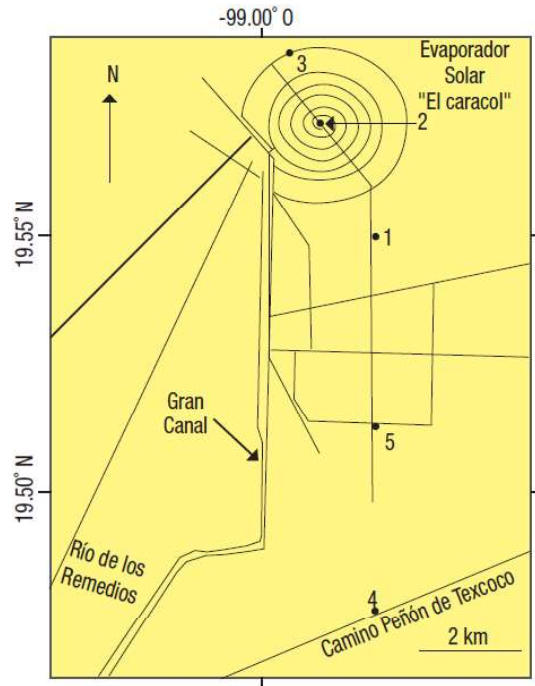
El material predominante en el subsuelo de este acuífero está constituido por arcillas impermeables en los primeros 40 m de profundidad; subyacen a este material intercalaciones de arenas, tobas y gravas de los abanicos aluviales hasta la profundidad de 200 m. La unidad lacustre del periodo Plioceno-Cuaternario, consiste de arcillas aluviales con arenas intercaladas (capas duras), y tiene un espesor de menos de 50 m en el oeste, 180 m en la zona centro y hasta 500 m en la región de Texcoco (CONAGUA, 2015).

Por otro lado, la correlación litológica de 5 pozos perforados para investigar las salmueras en el área del Cararcol (Figura 2.8), muestra diversos horizontes de sedimentos que permitieron establecer que la capa productora de salmueras desaparece hacia el centro del Lago de Texcoco, debido a las facies sedimentarias que cambian de sedimentos areno limosos y limo arenosos a facies arcillosas en la porción sur del lago.

La correlación litológica de los horizontes determinados se muestra en la Figura 2.9. Se destaca la presencia de capas duras que podrían asociarse con eventos de desecación máxima por periodos interglaciares, cuando el clima es frío y seco, en tanto que durante el Holoceno el nivel del lago ascendió debido a un clima cálido y húmedo.

Se observan diversos horizontes de cenizas, tanto básicas como ácidas, también el adelgazamiento de las salmueras (capa dura) y su cambio de facies limo arenosas con

porosidad móldica, a facies sedimentológicas de limos y limos arcillosos, con algunos sedimentos y arcillas arenosas hacia la posición meridional del pozo 4, perforado en el camino Peñón-Texcoco. A mayor profundidad hay una segunda capa dura en los núcleos 3, 4 y 5, la cual también sirvió como capa productora de salmueras.



**Figura 2.8.** Localización de los pozos perforados para investigar las concentraciones de salmueras, así como las columnas sedimentarias del acuífero salino (Tomada de Carranza-Edwards, 2018)

Con base en lo expuesto se determinó la estratigrafía del subsuelo en el Ex-Lago de Texcoco:

- 0 a 30 m = arcilla
- 30 a 40 m = primera "capa dura" (limo-arenosos)
- 40 a 60 m = segunda "capa dura" (limo-arenosos)
- 60 a 80 m = arcilla

Las mezclas de estos tipos de sedimentos arcillosos saturados en salmueras hacen que se trate de secuencias sedimentológicas vulnerables a eventos de terremotos, subsidencia y fracturamiento en el medio lacustre del Ex-Lago de Texcoco (Carranza Edwards, 2018).

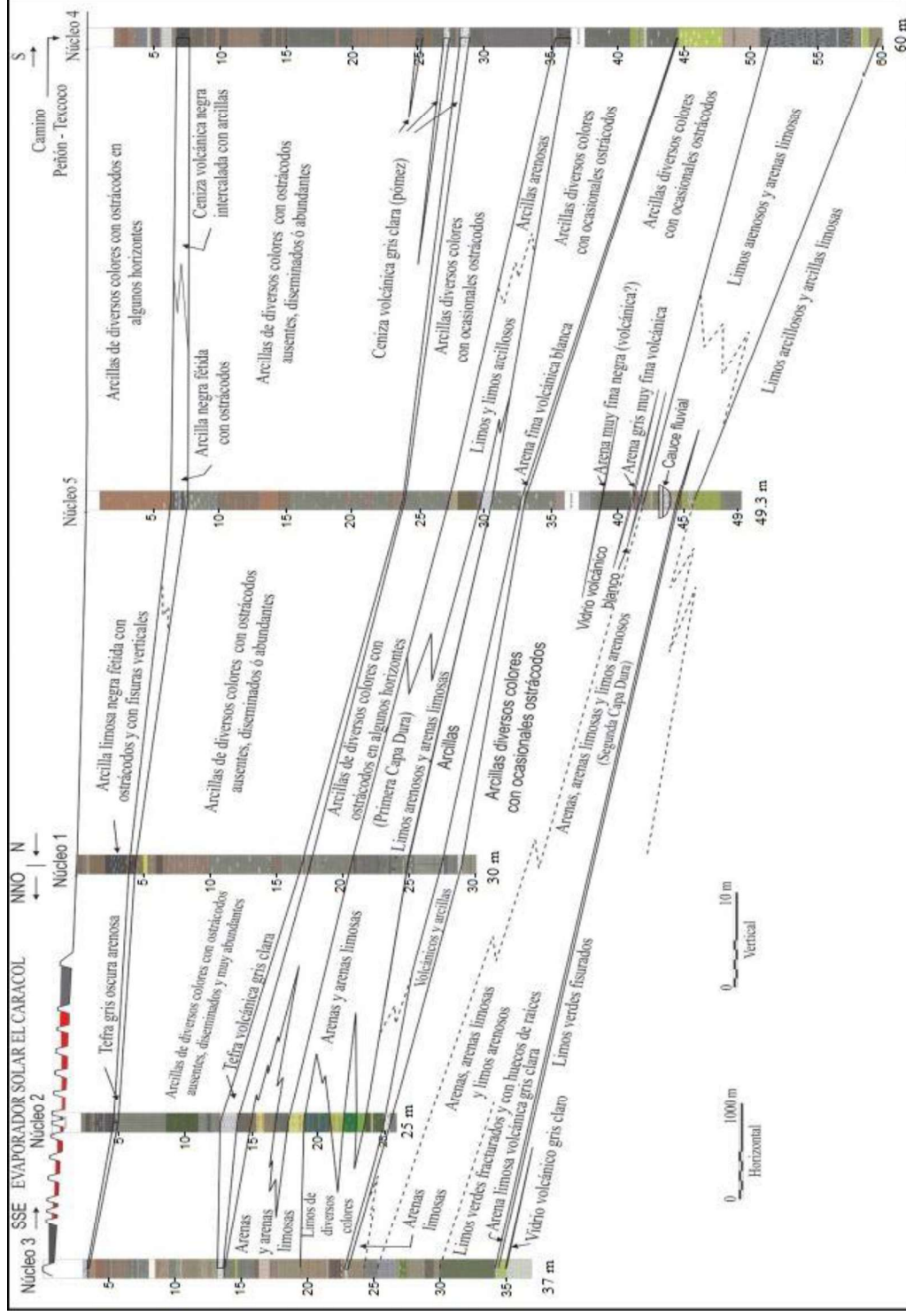


Figura 2.9. Correlación sedimentológica de muestras obtenidas con una máquina rotatoria con barril para recuperación continua de sedimentos (Tomada de Carranza-Edwards, 2018)



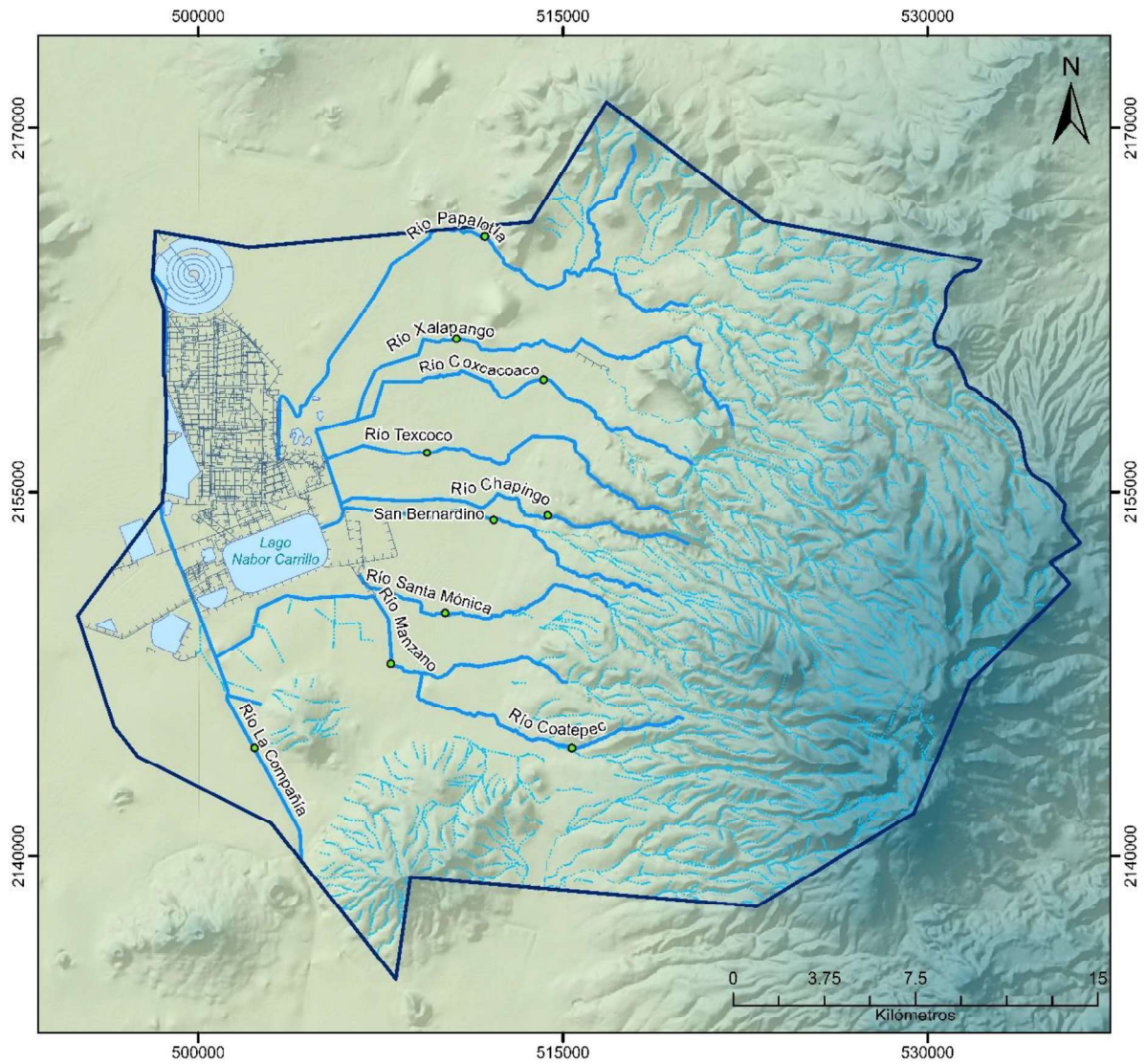
## 2.4. Hidrología superficial

Originalmente, la CVM contaba con un sistema de ríos que drenaban el agua de la cuenca hacia el sur, y estas corrientes superficiales que circulaban en dicha dirección fueron interrumpidas por la formación de la Sierra Chichinautzin hace aproximadamente 600,000 años. Esto causó el cierre del drenaje, lo cual transformó a la cuenca en una cuenca endorreica y propició la acumulación de agua en la parte central del valle dando origen a los lagos de Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco. Estos lagos se comunicaban frecuentemente entre sí; los lagos Xaltocan y Texcoco se formaron en las partes bajas y constituían vasos de evaporación, los lagos Xochimilco y Chalco eran alimentados con agua dulce (Gómez Evangelista, 2016).

El sistema hidrográfico del área está integrado principalmente de escurrimientos efímeros e intermitentes de carácter torrencial, con avenidas de corta duración y arroyos secos durante el estiaje (CONAGUA, 2018). Actualmente, la cuenca es drenada artificialmente por obras de ingeniería hacia el río Tula (Suárez Romero, 2019).

En el área perteneciente al acuífero se identifican 9 microcuencas, cuyos cauces principales corresponden a los ríos Papalotla, Xalapango, Coxacoaco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica, Coatepec y San Francisco (Figura 2.10); todos ellos descienden de la Sierra Nevada y desembocan en la zona federal del Ex-Lago de Texcoco y su destino final es el Dren Colector del Valle, que se une finalmente con las aguas residuales de la Ciudad de México para ser conducidas a través de canales hacia el exterior de la Cuenca del Valle México (CONAGUA, 2018). Hecho que se realiza desde el siglo XIX, con el fin de atenuar las inundaciones que antaño afectaba a toda esta región (Mendoza Archundia, 2012).

Otro rasgo de gran importancia dentro de la cuenca es el sistema hidrológico del Ex - Lago de Texcoco. Este sistema recibe aguas residuales provenientes de Chimalhuacán, Ciudad Nezahualcóyotl y Ecatepec, y de los ríos La Compañía y Churubusco, así como algunas entradas procedentes de las sierras del oriente (CONAGUA, 2018).



**SIMBOLOGÍA**

-  Ríos
-  Escurremientos
-  Canales
-  Evaporador solar "El Caracol"
-  Cuerpos de agua
-  Límite del acuífero Texcoco

Figura 2.10. Mapa de hidrología superficial del acuífero Texcoco (IGCEM, 2016)

## 2.5. Hidrología subterránea

Las rocas descritas anteriormente, por sus características permeables, pueden clasificarse en unidades hidroestratigráficas que, al agruparlas, pueden considerarse como acuíferos aquellos que tienen alta y media permeabilidad; en cambio, los de baja permeabilidad se consideran acuitardos y acuífugos y funcionan como barreras o fronteras al flujo de agua subterránea.

Los materiales permeables del área de estudio se concentran en la porción oriental y central, pueden considerarse como zonas de recarga al propiciar escurrimientos superficiales que en parte se infiltran al subsuelo a través de las rocas de la Formación Tarango, la parte extrema occidental está formada por rocas de baja permeabilidad (CONAGUA, 2018).

### 2.5.1. Unidades hidroestratigráficas

De acuerdo con la información estratigráfica recopilada y a las secciones geológicas propuestas, además de diversos estudios (CONAGUA, 2006; Leyva Suárez, 2010; Mendoza Archundia, 2012; López Martínez, 2019) y tomando como base el modelo de Suárez Romero (2019), se definieron las siguientes unidades hidroestratigráficas en el acuífero Texcoco:

#### Unidad hidroestratigráfica 1 (U1)

Constituida por sedimentos lacustres (Q1a) que se caracterizan por su baja permeabilidad; compuesta por un paquete de 0 a 80 m de espesor de arcillas muy deformables intercaladas con lentes y estratos arenosos y limo arenosos de vidrio volcánico delgados de 1 a 3 m de espesor. Esta unidad se encuentra sobresaturada con agua con concentraciones salinas de 5.000 a 10.000 ppm de sólidos totales disueltos (STD), lo que provoca que la unidad presente resistividades muy bajas de 1 a 10 Ohm/m. Hidrogeológicamente se comporta como un acuitardo confinante de muy baja permeabilidad; se le asigna un valor de conductividad hidráulica de  $K = 5.5 \times 10^{-9}$  m/s, tiene un rendimiento específico de 0.03 y un almacenamiento específico de  $1.13 \times 10^{-2}$ , de acuerdo al valor medio establecido para arcillas plásticas (CONAGUA-Proyectos y Servicios, S.A de C.V., 2006).

### Unidad hidroestratigráfica 2 (U2)

A partir de los 80 m y hasta los 300 m profundidad se encuentra un paquete areno-gravoso intercalado ocasionalmente con lentes arcillosos, derrames volcánicos y capas de cenizas. Esta unidad agrupa los depósitos aluviales (Qal) caracterizándose por una permeabilidad media. Se encuentra totalmente saturada y corresponde al acuífero principal en explotación de la zona; se trata de un acuífero libre en la región montañosa y confinado en la planicie, caracterizado por presentar agua de calidad media, variando de los 600 a 2.000 ppm de STD dependiendo de dónde se extraiga agua. Esta unidad presenta resistividades eléctricas que varían de 30 a 70 Ohm/m. Se propone un valor de conductividad hidráulica de  $4 \times 10^{-5}$  m/s; un rendimiento específico de 0.15 y almacenamiento específico de  $7.4 \times 10^{-5}$  correspondiente al valor medio para grava arenosa densa (CONAGUA-Proyectos y Servicios, S.A de C.V., 2006).

### Unidad hidroestratigráfica 3 (U3)

Constituye el basamento hidrogeológico del acuífero principal. A los 300 m de profundidad, se encuentra un paquete compuesto por depósitos piroclásticos, calizas lacustres y margas (Tppc) de unos 150 m de espesor, compacto y de baja a nula permeabilidad. Ha sido detectado en las exploraciones profundas realizadas por SHCP (1969).

Se caracteriza por tener resistividades eléctricas  $>38$  Ohm/m. Se calculó una conductividad hidráulica para esta unidad de  $1 \times 10^{-11}$  m/s, su rendimiento específico se asoció al valor medio para calizas (0.14) y su almacenamiento se asignó un valor de  $1 \times 10^{-7}$  asociado a los valores para rocas sólidas. Se desconocen los niveles de calidad del agua para esta unidad (Suárez Romero, 2019).

### Unidad hidroestratigráfica 4 (U4)

Constituida por las coladas lávicas que forman parte de la Sierra Río Frío y Santa Catarina (Qt, Qpp, Tpv) y cuenta con un espesor máximo en el centro de la Sierra Río Frío de 1,800 m el cual se acuña hacia los alrededores. Es una unidad acuífera de alta productividad en

rocas volcánicas localizadas en zonas de mayor elevación correspondientes a la zona de recarga.

La unidad acuífera cuenta con una conductividad hidráulica por fracturamiento de alrededor de  $3 \times 10^{-5}$  m/s y rendimiento específico de 0.04, valores que fueron tomados del estudio de CONAGUA (2006). Para el almacenamiento específico se consideró un valor medio de  $3.6 \times 10^{-5}$  para rocas fracturadas (Suárez Romero, 2019; CONAGUA-Proyectos y Servicios, S.A de C.V., 2006).

### Unidad hidroestratigráfica 5 (U5)

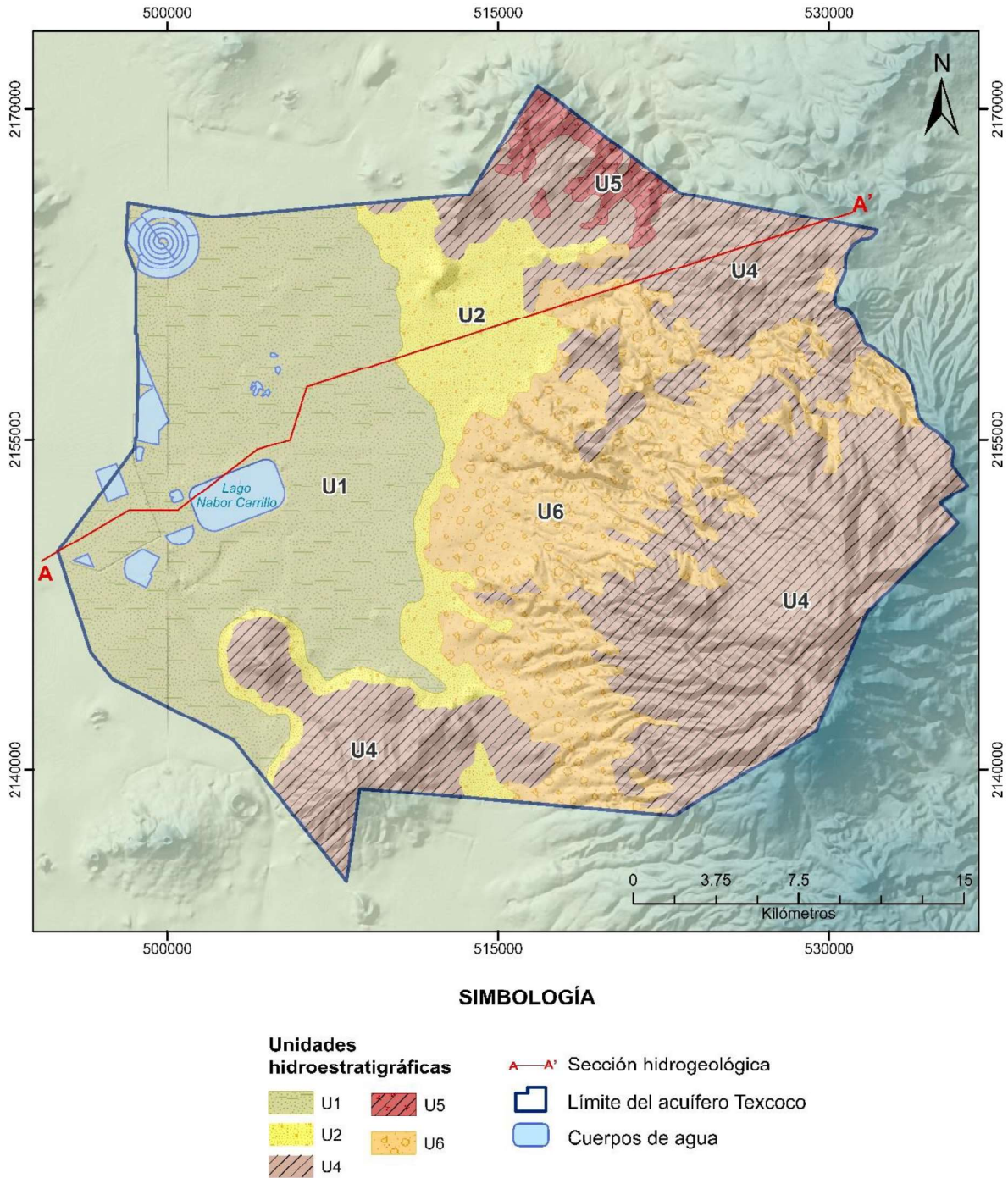
Representa rocas antiguas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano, fracturadas, de productividad media a baja y que se encuentran alojados en secuencias de rocas volcánicas (tobas y brechas) interestratificadas con lavas de tipo andesítico (Tmv, Tomv), con un espesor mayor a los 1,500 m y con valores de conductividad hidráulica de  $7.5 \times 10^{-5}$  m/s (CONAGUA 2006). Debido a la falta de datos de campo, se consideró un rendimiento específico para tobas de 0.2 propuesto por Morris et al. (1967) y un almacenamiento específico medio para rocas fracturadas de  $3.6 \times 10^{-5}$  (Domenico, 1972).

### Unidad hidroestratigráfica 6 (U6)

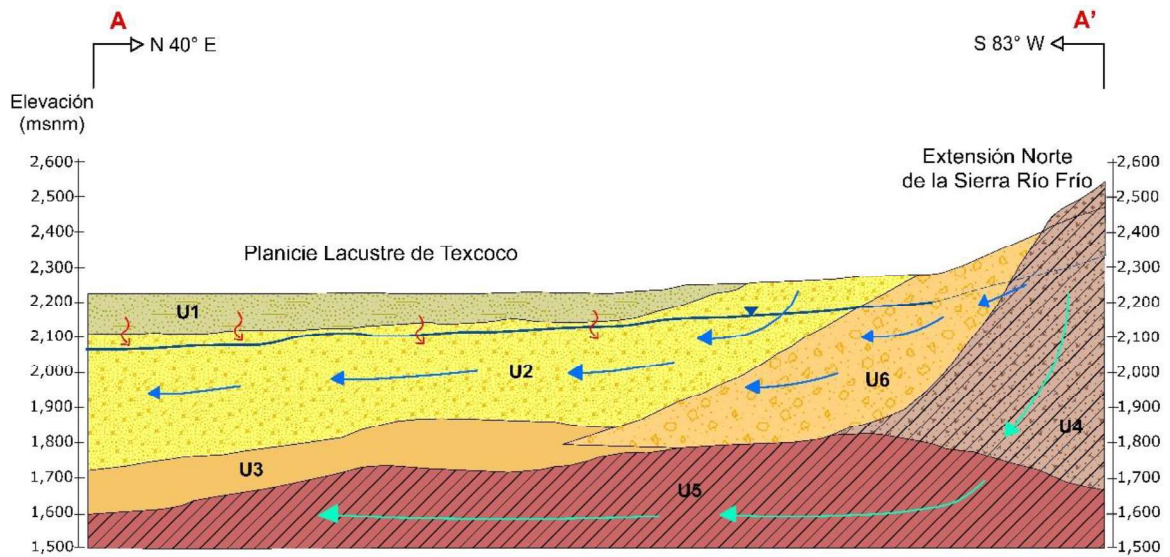
Constituida por depósitos piroclásticos (Tpt) (tobas y lahares) que fueron originados por procesos gravitacionales y eruptivos, los cuales se encuentran interdigitados con cenizas y lavas del Cuaternario. Esta unidad aflora en los pies de todas las elevaciones del Terciario Medio y Superior de la Sierra Nevada, Sierra de Guadalupe y la Sierra de las Cruces. Cuenta con un espesor promedio de 350 m.

Con base en los estudios realizados por CONAGUA-Proyectos y Servicios, S.A de C.V. (2006) y Goevaluaciones y Perforaciones S.A. de C.V. (2012), se determinó que los valores de conductividad hidráulica y rendimiento específico calculados en campo son de  $3.7 \times 10^{-6}$  y 0.2 m/s respectivamente. Para el valor del almacenamiento específico, se consideró un valor medio dentro del campo de rocas fracturadas, el cual es  $3.6 \times 10^{-5}$  (Suárez Romero, 2019).

En la Figura 2.11 se muestra la distribución superficial de las unidades hidroestratigráficas del acuífero; así como una sección hidrogeológica (Figura 2.12) que muestra su geometría y la distribución de las unidades hidroestratigráficas en el subsuelo.



**Figura 2.11.** Mapa de unidades hidroestratigráficas y localización de la sección hidrogeológica A-A'. Acuífero Texcoco.



**SIMBOLOGÍA**

- Nivel estático
- - - Nivel estático inferido
- ← Línea de flujo local
- ← Línea de flujo intermedio
- ↯ Goteo

**Unidades hidroestratigráficas**

- U1** Esta unidad funciona como un acuitardo semiconfinante de muy baja permeabilidad
- U2** Esta unidad se encuentra totalmente saturada y corresponde al acuífero principal de la zona (acuífero granular superior)
- U3** Esta unidad corresponde al basamento hidrogeológico del acuífero principal
- U4** Unidad acuífera de alta productividad con permeabilidad por fracturamiento
- U5** Unidad acuífera de media - baja productividad, con permeabilidad por fracturamiento
- U6** Unidad por la cual se infiltra el agua superficial que recarga al acuífero

Figura 2.12. Sección hidrogeológica A-A'. Acuífero Texcoco (Modificada de Suárez Romero, 2019)

### 2.5.2. Piezometría y comportamiento hidráulico

Para establecer y analizar el comportamiento de los niveles de agua subterránea del acuífero Texcoco, se utilizaron datos de la red piezométrica del Valle de México (a cargo del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM)) del periodo 1969-2018. Con la información de 34 pozos de observación (Tabla 2.1) y con los datos de medición de la profundidad del nivel del agua subterránea, se obtuvo la elevación del nivel piezométrico y se pudo construir el mapa de red de flujo para el año 2018, así como el mapa de profundidad del nivel piezométrico.

**Tabla 2.1.** Datos sobre la profundidad del nivel y elevación del nivel del agua subterránea

Clave del pozo	Longitud X	Latitud Y	Cota en m.s.n.m.	Profundidad del nivel 2018 (m)	Elevación del nivel 2018 (m.s.n.m.)
BO-37V	515860	2154870	2352.0	123.20	2228.8
B-273	507830	2166924	2244.0	61.58	2182.4
B-465	505961	2163726	2243.0	75.54	2167.5
B-497	508783	2161714	2264.0	72.80	2191.2
C-953V	512686	2160290	2252.0	65.23	2186.8
D-868	511146	2148940	2251.0	86.24	2164.8
DO-35	520159	2161604	2371.0	100.84	2270.2
EA-82	515788	2161123	2272.0	33.50	2238.5
EB-15	514299	2160088	2258.0	74.91	2183.1
EC-11	513227	2161552	2253.0	66.26	2186.7
ED-12	512356	2160643	2251.0	70.15	2180.9
EJ-18	516804	2159534	2275.0	90.65	2184.4
EJ-20	517369	2160384	2285.0	50.03	2235.0
EJ-51V	518650	2163988	2292.0	54.69	2237.3
EJ-72	518830	2164447	2293.0	34.83	2258.2
EJ-86	517603	2160466	2280.0	45.84	2234.2
EL-87V	515421	2162547	2263.0	65.82	2197.2
EM-03	514170	2162998	2258.0	64.51	2193.5
EM-74	516352	2163662	2275.0	63.39	2211.6
EN-83	511442	2158767	2246.0	73.33	2172.7
EO-20	512999	2156719	2252.0	76.98	2175.0
EP-87	510721	2159609	2245.0	72.31	2172.7
ER-14	511021	2152754	2248.0	73.18	2174.8



**Tabla 2.1.** Datos sobre la profundidad del nivel y elevación del nivel del agua subterránea (continuación)

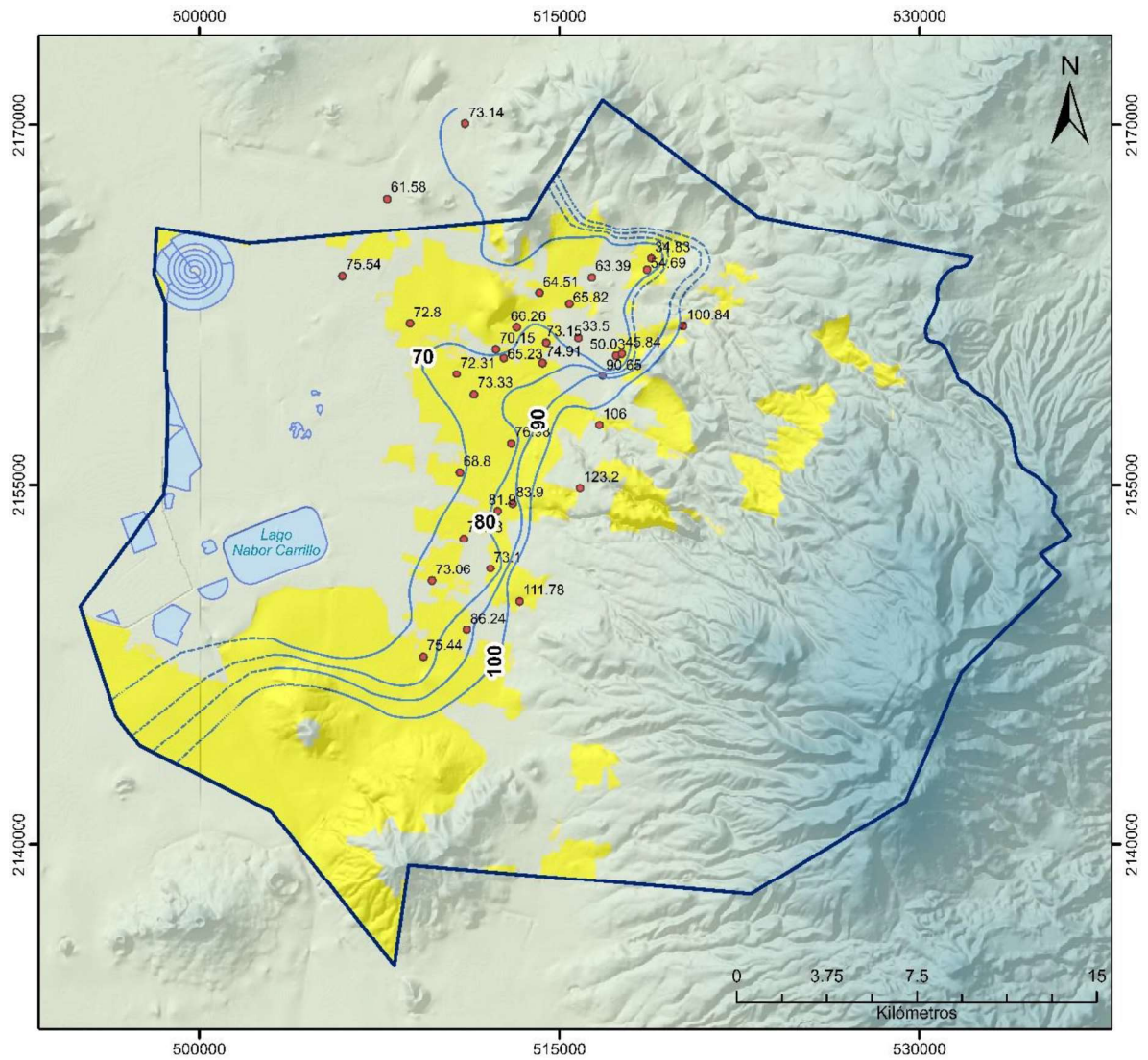
Clave del pozo	Longitud X	Latitud Y	Cota en m.s.n.m.	Profundidad del nivel 2018 (m)	Elevación del nivel 2018 (m.s.n.m.)
ER-26V	509692	2150985	2245.0	73.06	2171.9
ER-87V	512431	2153896	2252.0	81.90	2170.1
ER-88	513050	2154210	2265.0	83.90	2181.1
ER-96	512131	2151504	2260.0	73.10	2186.9
ES-05V	513344	2150127	2296.0	111.78	2184.2
ET-77V	508333	2149284	2249.0	69.31	2179.7
EX-07V	510853	2155517	2247.0	68.80	2178.2
E-44V	511068	2170050	2273.0	73.14	2199.9
E-708V	514453	2160919	2257.0	73.15	2183.9
F-107	509340	2147819	2248.0	75.44	2172.6
110-B	516669	2157498	2290.0	106.00	2184.0

En la Figura 2.13 se muestra el mapa de profundidad del nivel del agua subterránea correspondiente al año 2018. Los máximos valores de profundidad se localizan en la porción oriental del valle, en la cercanía de la denominada Sierra de Quetzaltepec y el volcán Tláloc, donde se presentan profundidades superiores a los 100 m (BO-37V y ES-05V), mientras que los valores más someros se observan en la zona del Lago Nabor Carrillo, y a partir de ahí se incrementan gradualmente hacia el norte y este, donde se encuentran las sierras que delimitan el acuífero.

Los valores del nivel piezométrico varían de 2,167 a 2,240 msnm (Figura 2.14), las mayores elevaciones se presentan en la zona noreste del acuífero, y desde esta zona descienden gradualmente por el efecto topográfico hacia el valle. Las menores elevaciones varían de 2,167 a 2,190 msnm, y se presentan en la porción occidental del acuífero, en la zona que circunda el Lago Nabor Carrillo y “El Caracol”. Al sur del acuífero, en las inmediaciones del Cerro Chimalhuacán, la elevación del nivel es entre 2,180 y 2,190 msnm.

De acuerdo con estos datos, se determinó que la principal fuente de recarga para el acuífero proviene de la Sierras Quetzaltepec y Río Frío ubicadas al este, así como del volcán La

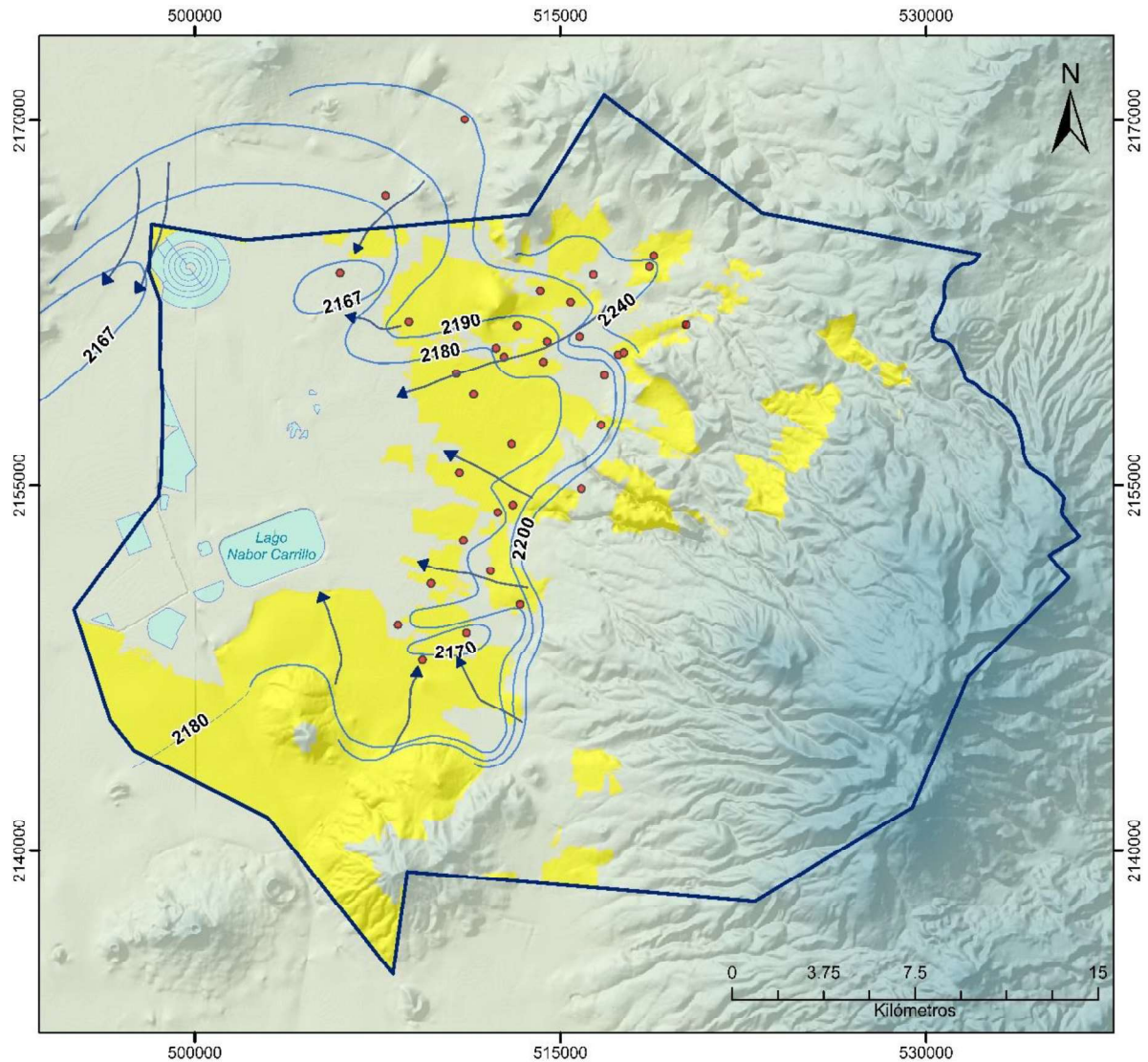
Caldera que se encuentra al sur, dirigiéndose el flujo hacia la zona centro y oeste del acuífero, siendo el centro la zona con la mayor concentración de pozos de extracción.



**SIMBOLOGÍA**

- |   |                             |
|---|-----------------------------|
| <b>Profundidad del nivel del agua subterránea (m)</b> | Límite del acuífero Texcoco |
| Isolíneas de profundidad del nivel                    | Zona urbana                 |
| Isolíneas inferidas de profundidad del nivel          | Cuerpos de agua             |
| Pozos de observación                                  |                             |

**Figura 2.13.** Mapa de profundidad del nivel del agua subterránea del acuífero Texcoco. Año 2018 (Elaboración propia con base en datos de OCAVM, 2018)



**SIMBOLOGÍA**

- |   |                             |
|---|-----------------------------|
| <b>Piezometría 2018 (msnm)</b>                      | Límite del acuífero Texcoco |
| Isocintas de nivel piezométrico                     | Zona urbana                 |
| Isocintas inferidas de nivel piezométrico           | Cuerpos de agua             |
| Dirección aproximada del flujo del agua subterránea |                             |
| Pozos de observación                                |                             |

Figura 2.14. Mapa piezométrico del acuífero Texcoco. Año 2018 (Elaboración propia con base en datos de OCAVM, 2018)

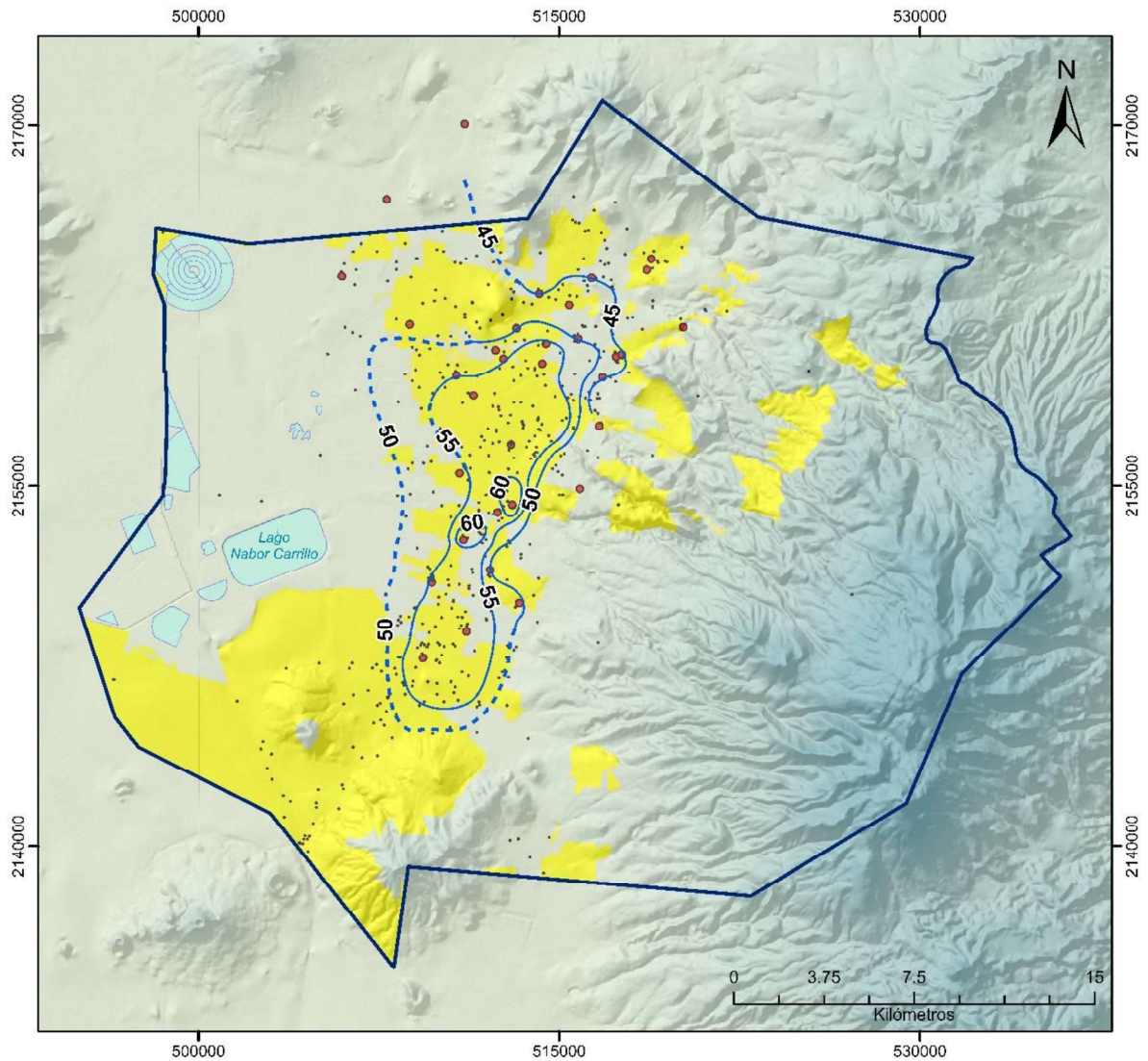
Respecto a la evolución del nivel piezométrico, se analizó el periodo 1969-2018 para visualizar de manera general la evolución que ha tenido la piezometría del acuífero en este intervalo de tiempo, se observa que la principal zona de extracción del acuífero presenta descensos del nivel del agua subterránea que van hasta los 60 m. Los valores puntuales de 60 m de abatimiento corresponden a los piezómetros .ER-14 y .ER-88 localizados en los alrededores de las localidades de San Bernardino y San Nicolás Huexotla, en el municipio de Texcoco (Figura 2.15).

Por su parte la zona de más de 55 m de abatimiento encierra gran parte de los pozos productivos del valle, desde la localidad de Chicoloapan de Juárez municipio de Chicoloapan al sur del área de estudio, hasta la localidad de Tulantongo, municipio de Texcoco, al norte del área de estudio.

De acuerdo con los 18 piezómetros analizados, el ritmo de abatimiento promedio anual para el periodo 1969-2018 es de 1 m/año (Tabla 2.2).

**Tabla 2.2.** Valores de abatimientos del nivel piezométrico del acuífero Texcoco (periodo 1969-2018)

Clave del pozo	Longitud X	Latitud Y	Cota en m.s.n.m.	Profundidad del nivel 1969 (m)	Profundidad del nivel 2018 (m)	Evolución del nivel 69-18 (m)
B-273V	507830	2166924	2244	12.1	61.6	49.5
C-953V	512686	2160290	2252	12.0	65.2	53.2
EB-15	514299	2160088	2258	15.1	74.9	59.8
.EC-11	513227	2161552	2253	16.0	66.3	50.3
.ED-12	512356	2160643	2251	15.0	70.3	55.3
.EJ-18	516804	2159534	2275	43.0	90.7	47.7
.EJ-20	517369	2160384	2285	35.0	50.0	15.0
.EJ-51V	518650	2163988	2292	13.4	54.7	41.3
.EJ-72	518830	2164447	2293	18.0	34.8	16.8
.EJ-86	517603	2160466	2280	32.5	45.8	13.3
.EL-87V	515421	2162547	2263	19.6	65.8	46.2
.EM-03	514170	2162998	2258	19.5	64.5	45.0
.EN-83	511442	2158767	2246	16.2	73.3	57.1
.ER-14	511021	2152754	2248	11.6	73.2	61.6
.ER-87V	512431	2153896	2252	23.0	81.9	58.9
.ER-88	513050	2154210	2265	23.0	83.9	60.9
.ER-96	512131	2151504	2260	24.5	73.1	48.6
.ES-05V	513344	2150127	2296	57	111.7	54.7



**SIMBOLOGÍA**

- |   |                             |
|---|-----------------------------|
| <b>Isolíneas de abatimiento (m)<br/>periodo 1969 - 2018</b> | Límite del acuífero Texcoco |
| Isolíneas de abatimiento                                    | Cuerpos de agua             |
| Isolíneas de abatimiento inferidas                          | Zona urbana                 |
| Pozos de observación  |                             |
| Pozos de extracción   |                             |

**Figura 2.15.** Mapa de isoabatimientos del nivel piezométrico del acuífero Texcoco. Periodo 1969-2018 (Elaboración propia con base en datos de OCAVM, 1969 y 2018)

### 2.5.3. Censo de aprovechamientos

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2006, habían registrados un total de 1,009 aprovechamientos, de los cuales 552 eran activos y 457 inactivos. De los aprovechamientos activos 528 eran pozos, 19 manantiales y 5 norias que se localizan en la porción norte del acuífero, en las inmediaciones de Tepetlaoxtoc. Mediante estos aprovechamientos se extraía un volumen total de 183.1 Mm<sup>3</sup>/año, de este total, 172.5 Mm<sup>3</sup>/año fueron extraídos por medio de pozos, 0.1 Mm<sup>3</sup>/año por norias y 10.4 Mm<sup>3</sup> provenientes de manantiales (CONAGUA-Proyectos, Estudios y Servicios, S.A de C.V., 2006).

La distribución del volumen de extracción por uso con base en los datos del año 2006 es: 128.4 Mm<sup>3</sup>/año destinado para uso público-urbano (70.1 %), 48.5 Mm<sup>3</sup> anuales para uso agrícola (26.6 %), 3.7 Mm<sup>3</sup> (2.0 %) para uso industrial, 1.6 Mm<sup>3</sup> al año para diferentes usos y servicios (0.9 %) y, finalmente, 0.8 Mm<sup>3</sup> para uso pecuario (0.4 %) (CONAGUA, 2006; CONAGUA, 2014).

Posterior a este censo, se presentó una modificación a la poligonal del acuífero publicada el 28 de agosto del 2009 en el Diario Oficial de la Federación. En esta modificación, se incluyó una superficie adicional de los municipios de Tepetlaoxtoc, Texcoco, Atenco y Nezahualcóyotl, así como la integración al acuífero de una pequeña proporción del municipio de Ecatepec, mientras que, en la parte sur, se disminuyó una superficie importante del municipio de Ixtapaluca.

Con la nueva poligonal y con los títulos registrados en el REPDA con fecha de corte al mes de octubre del 2019, el acuífero cuenta con un volumen concesionado de 243.76 Mm<sup>3</sup>/año proveniente de pozos y de 8.81 Mm<sup>3</sup>/año correspondiente a manantiales ubicados dentro de la poligonal del área de estudio.

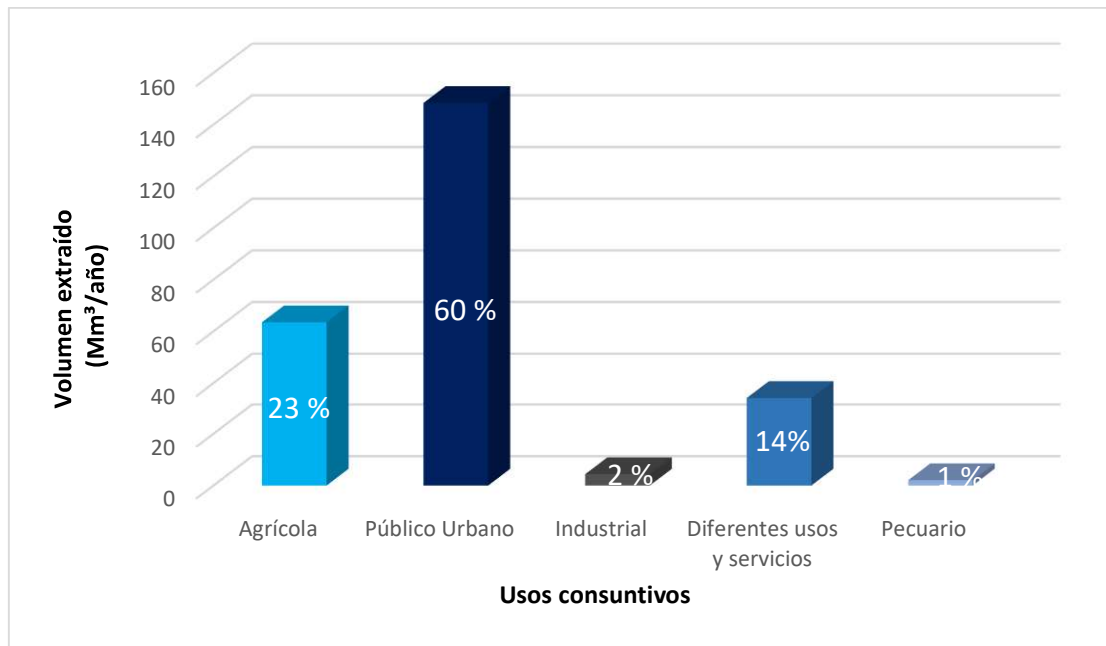
En lo que respecta a los usos del agua, se tiene que del volumen concesionado el 60 % es destinado al uso público urbano (146.57 Mm<sup>3</sup>/año), seguido del uso agrícola (56.58 Mm<sup>3</sup>/año) que representa el 23 % del total de extracción; un volumen de 34.15 Mm<sup>3</sup>/año (14 %) para diferentes usos (doméstico, público-urbano, industrial, comercio y servicios); finalmente 4.38 Mm<sup>3</sup>/año (2 %) destinados al uso industrial y 2.1 Mm<sup>3</sup>/año para uso

pecuario (0.1 %). El volumen total de agua subterránea que se destina para los usos consuntivos se muestra en la Tabla 2.3 y en la Figura 2.16.

En el caso del volumen correspondiente a manantiales, el mayor volumen es destinado para uso agrícola seguido del uso público-urbano, con un total de 6.91 Mm<sup>3</sup>/año (lo que representa el 78.4 %) y 1.83 Mm<sup>3</sup>/año (20.7 %), respectivamente.

**Tabla 2.3.** Volumen concesionado y usos consuntivos del agua subterránea en el acuífero Texcoco (REPDA, 2019)

Usos consuntivos	Volumen extraído en pozos (Mm <sup>3</sup> /año)	Volumen de manantiales (Mm <sup>3</sup> /año)
Agrícola	56.58	6.91
Público Urbano	146.57	1.83
Industrial	4.38	0
Diferentes usos	34.15	0.08
Pecuario	2.07	0
<b>Total</b>	<b>243.76</b>	<b>8.81</b>



**Figura 2.16.** Volumen concesionado y su distribución por uso consuntivo en el acuífero Texcoco (REPDA, 2019)

Así mismo, hay que destacar que dentro del área del acuífero Texcoco se localiza un sistema de pozos adicionales (el ramal Peñón- Texcoco (Figura 2.17)) pertenecientes al Sistema PAI (Programa de Acción Inmediata) de la Ciudad de México, que se construyó como una solución temporal para satisfacer la creciente demanda de agua potable del Valle de México en la década de 1970. El Sistema PAI se encuentra distribuido en 7 ramales o baterías; Tizayuca-Pachuca, Teoloyucan, Los Reyes-Ferrocarril, Los Reyes-Ecatepec, Peñón- Texcoco, Mixquic-S. Catarina y Tláhuac-Nezahualcóyotl (Escolero, et al., 2016). Es operado por OCAVM de la CONAGUA y en su totalidad abastece a 4 alcaldías de la Ciudad de México, 2 municipios del Estado de Hidalgo y 14 municipios del Estado de México.

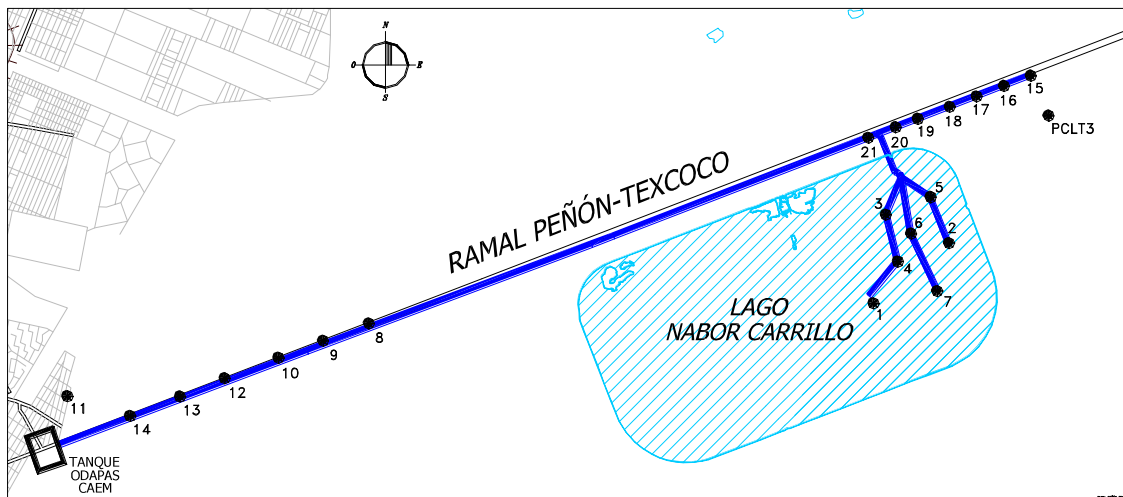


Figura 2.17. Ramal de pozos Peñón- Texcoco (CONAGUA-Ariel Consultores, S.A., 2006)

### 2.5.4. Balance y disponibilidad del acuífero

El balance vigente del acuífero Texcoco fue estimado por la CONAGUA en el año 2014, el cual ha sido utilizado para calcular la disponibilidad del acuífero en los últimos años. En este balance, se establecen entradas del orden de los 145.1 Mm<sup>3</sup>/año y salidas del orden de los 193.5 Mm<sup>3</sup>/año, de las cuales 10.4 Mm<sup>3</sup> corresponden a la descarga natural comprometida a través de los manantiales ubicados en el área de estudio.



Para el cálculo de este balance, se utilizó la evolución de los niveles piezométricos correspondientes al periodo 2006-2011 y una superficie de 700 km<sup>2</sup>. De acuerdo con lo establecido en el balance, la selección de esta área se debe a que en dicha zona se cuenta con más información piezométrica y corresponde a la zona de mayor productividad del acuífero (CONAGUA, 2014).

De esta forma, con base en la evolución del nivel estático para este periodo y considerando un rendimiento específico  $S_y$  variable de 0.10 a 0.15 y un coeficiente de almacenamiento promedio de 0.05, se determinó el cambio del almacenamiento en el área de balance, el cual fue del orden de los -48.4 Mm<sup>3</sup> anuales. En la Tabla 2.4 se detallan las estimaciones de los componentes del balance.

La disponibilidad media anual en el acuífero se determinó considerando una recarga media anual de 145.1 Mm<sup>3</sup>/año; una descarga natural comprometida de 10.4 Mm<sup>3</sup> y un volumen concesionado e inscrito en el REPDA al 31 de diciembre de 2015, de 246.56 Mm<sup>3</sup>/año, resultando una disponibilidad media anual de agua subterránea nula, con un déficit de -111.86 Mm<sup>3</sup>/año.

**Tabla 2.4.** Balance hídrico vigente del acuífero Texcoco (CONAGUA, 2014)

<b>Balance del Acuífero</b>	
<b>Entradas (Mm<sup>3</sup>/año)</b>	
Recarga vertical natural	101.1
Recarga por flujo subterráneo horizontal	38.7
Recarga inducida	5.3
<b>Subtotal</b>	<b>145.1</b>
<b>Salidas (Mm<sup>3</sup>/año)</b>	
Extracción	183.1
Descarga natural comprometida	10.4
<b>Subtotal</b>	<b>193.5</b>
<b>CAMBIO DE ALMACENAMIENTO</b>	<b>-48.4</b>
<b>COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO</b>	<b>0.05</b>

Este resultado indica que el acuífero presenta una condición de déficit o sobreexplotación, lo que significa que no existe volumen disponible de agua para otorgar nuevas concesiones y que se está extrayendo agua a costa del almacenamiento no renovable del acuífero.

Esta condición de sobreexplotación ha traído como consecuencia efectos negativos, tales como el abatimiento de los niveles del agua subterránea, con la consecuente inutilización de pozos y el incremento de los costos de bombeo, la modificación del sistema de flujo subterráneo, la disminución e incluso desaparición de los manantiales, además de los hundimientos diferenciales del terreno con el consecuente daño a la infraestructura urbana, así como el deterioro de la calidad del agua subterránea, por lo que, de seguir incrementándose la extracción de agua subterránea, existe el riesgo de agravar aún más la sobreexplotación del acuífero y sus efectos negativos (DOF, 2019; UNAM & CNDH, 2018).

### **2.5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua del acuífero**

El agua subterránea en algunas zonas del acuífero presenta elevada salinidad de origen natural, por lo que no es apta para consumo humano y limita en gran parte las actividades humanas. Adicionalmente, existe el riesgo de contaminación del agua subterránea por fuentes potenciales de contaminación como retornos de riego con agua contaminada por el uso de agroquímicos, fugas de las redes de alcantarillado, y lixiviados provenientes de tiraderos de basura o zonas industriales, entre otras (DOF, 2019).

De acuerdo con los análisis fisicoquímicos de las muestras de agua recolectadas en 1995 y 2007, en las zonas Peñón-Texcoco y Lago Nabor Carrillo el agua subterránea rebasa los límites máximos permisibles que establece la "Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, para salud ambiental y agua para uso y consumo humano", en las concentraciones de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , Mg, SDT, Fe y Mn (CONAGUA-Proyectos y Servicios, S.A de C.V., 2006; CONAGUA-Ariel Consultores, S.A., 2007; CONAGUA, 2018).

El cloruro rebasa los 250 mg/L, límite establecido para consumo humano; en un pozo del ramal Peñón-Texcoco se encontraron concentraciones de 311 mg/L, y en un pozo del ramal Lago Nabor Carrillo de 352 mg/L; mientras que las concentraciones menores de cloruros

ocurren en la región oriental del acuífero, en la zona de recarga, donde son comunes valores del orden de 20 a 30 mg/L (CONAGUA-Ariel Consultores, S.A., 2007).

Tres muestras, dos procedentes de pozos ubicados del ramal Lago Nabor Carrillo y una muestra procedente de un pozo del ramal Peñón-Texcoco, rebasan los 1,000 mg/L de SDT, límite máximo establecido por la norma referida; mientras que las menores concentraciones de SDT se presentan en la porción oriental del acuífero (CONAGUA, 2018).

Las concentraciones de cloruro superiores al valor límite permisible en la región del Ex-Lago de Texcoco se relacionan con el drenado del acuitardo lacustre sobreyacente. En este sentido, la calidad del agua subterránea en el acuitardo ha sido identificada en forma indirecta por medio de geofísica y directa por medio de toma de muestras en pozos y piezómetros y extracción del agua de poro en núcleos de sedimentos. Los resultados de dichas investigaciones indican que, en general, el agua subterránea contenida en el acuitardo lacustre se considera de mala calidad, al compararla con la norma referida de uso y consumo humano. Aunque la información disponible relacionada con la distribución espacial de los solutos disueltos en el acuitardo no es abundante, es posible establecer que la salinidad del agua presenta una distribución heterogénea dentro del cuerpo arcilloso (CONAGUA, 2018; DOF, 2019).

Los valores de SDT que se detectan en la zona que ocupaba el Ex-Lago de Texcoco se encuentran entre 37,000 a 195,000 mg/L. Para el caso de concentraciones de cloruro, los valores máximos son del orden de 60,000 mg/L, a una profundidad de 20 m, en los sedimentos lacustres de la planicie de Texcoco (CONAGUA, 2018).

Las características del acuífero semiconfinado en la región del Ex-Lago de Texcoco, favorecen la generación de condiciones reductoras en el subsuelo, que facilitan la movilización de ciertas especies iónicas. De este modo, las concentraciones de especies redox que se detectan en el agua subterránea de algunos pozos ubicados en las regiones con agua de mala calidad, indican que las condiciones redox a profundidad constituyen un factor determinante en la movilidad de especies como el nitrógeno amoniacal, hierro,

manganeso y ácido sulfhídrico, que representan un problema en la calidad del agua potable (CONAGUA, 2018).

Para el caso del hierro y manganeso, la información señala que la gran mayoría de los pozos de los ramales Peñón-Texcoco y Lago Nabor Carrillo, presentan concentraciones superiores al límite máximo permisible para consumo humano por la norma referida, de 0.3 y 0.15 mg/L, respectivamente (CONAGUA-Ariel Consultores, S.A., 2007).

Respecto a las familias del agua por iones dominantes, de acuerdo con Mendoza Archundia (2012), las principales familias de agua quedan distribuidas de la siguiente manera:

- Cálctica Sódica Clorurada (Ca-Na-Cl): En la zona donde se localizan pozos con estas características existe una alta densidad de pozos de extracción que genera que el agua extraída mantenga altas concentraciones de sales. En esta zona se encuentran dos subfamilias de agua: Na-Ca-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Na-Ca-Cl, las cuales también presentan altos contenidos en sales.
- Sódica Magnésica Bicarbonatada (Na-Mg-HCO<sub>3</sub>): Corresponde a pozos de una zona de recarga al sur de la cuenca, en donde el alto contenido de sodio es debido a la disolución, principalmente, de las plagioclasas encontradas en la andesita y el magnesio o calcio, elementos registrados en menor proporción en la composición química del agua, es debido seguramente a la disolución de piroxenos.
- Cálctica Sódica Magnésica Bicarbonatada (Ca-Na-Mg- HCO<sub>3</sub>): Se detecta en una amplia zona de recarga al este de la cuenca. Su origen es un proceso de disolución diferente comparado con la familia del sur de la cuenca, existiendo en este caso una mayor disolución en los piroxenos que de plagioclasas.
- Sódica Bicarbonatada Clorurada (Na-HCO<sub>3</sub>-Cl): Se presenta al oeste de la cuenca. Sus características pueden ser debidas a que los pozos se encuentran a una mayor profundidad.

Considerando las direcciones de flujo desde las zonas norte, sur y oriental hacia la región centro occidental del acuífero, en donde se ubica el Ex-Lago de Texcoco, es lógico que, en las zonas de recarga el agua de los pozos presenta menores concentraciones de salinidad,

incrementándose hacia la zona de descarga que está representada por el Ex-Lago de Texcoco (CONAGUA, 2018; DOF, 2019).

Cabe considerar que la disposición, tránsito y uso de aguas residuales en la zona, constituye una fuente potencial de contaminación, ya que las aguas residuales se transportan a lo largo de canales abiertos sin revestimiento (Huizar-Alvarez, et al., 2004; Prado-Hernández, et al., 2017).

La alta concentración de materia orgánica en el agua residual explica los altos valores de demanda bioquímica de oxígeno encontrados e indica que el agua residual sin tratamiento no debe utilizarse para riego, mucho menos para el sector público-urbano. De hecho, en el agua del río Texcoco, una de las muchas corrientes superficiales no tratadas en el acuífero, se detectó que la presencia de coliformes fecales excede los límites permisibles para el riego y el uso público y urbano (Guzmán-Quintero, et al., 2007; Prado-Hernández, et al., 2017; CONAGUA, 2018).

### **2.6. Fenómenos de subsidencia y agrietamiento**

El subsuelo lacustre del Valle de México presenta un fenómeno regional de subsidencia que afecta el área urbana desde principios del siglo XX (Auvinet, et al., 2017). La velocidad actual del hundimiento varía desde unos pocos centímetros al año hasta diez veces más en ciertas zonas con grandes espesores de materiales lacustres (Simoh, 2015; Auvinet, et al., 2016).

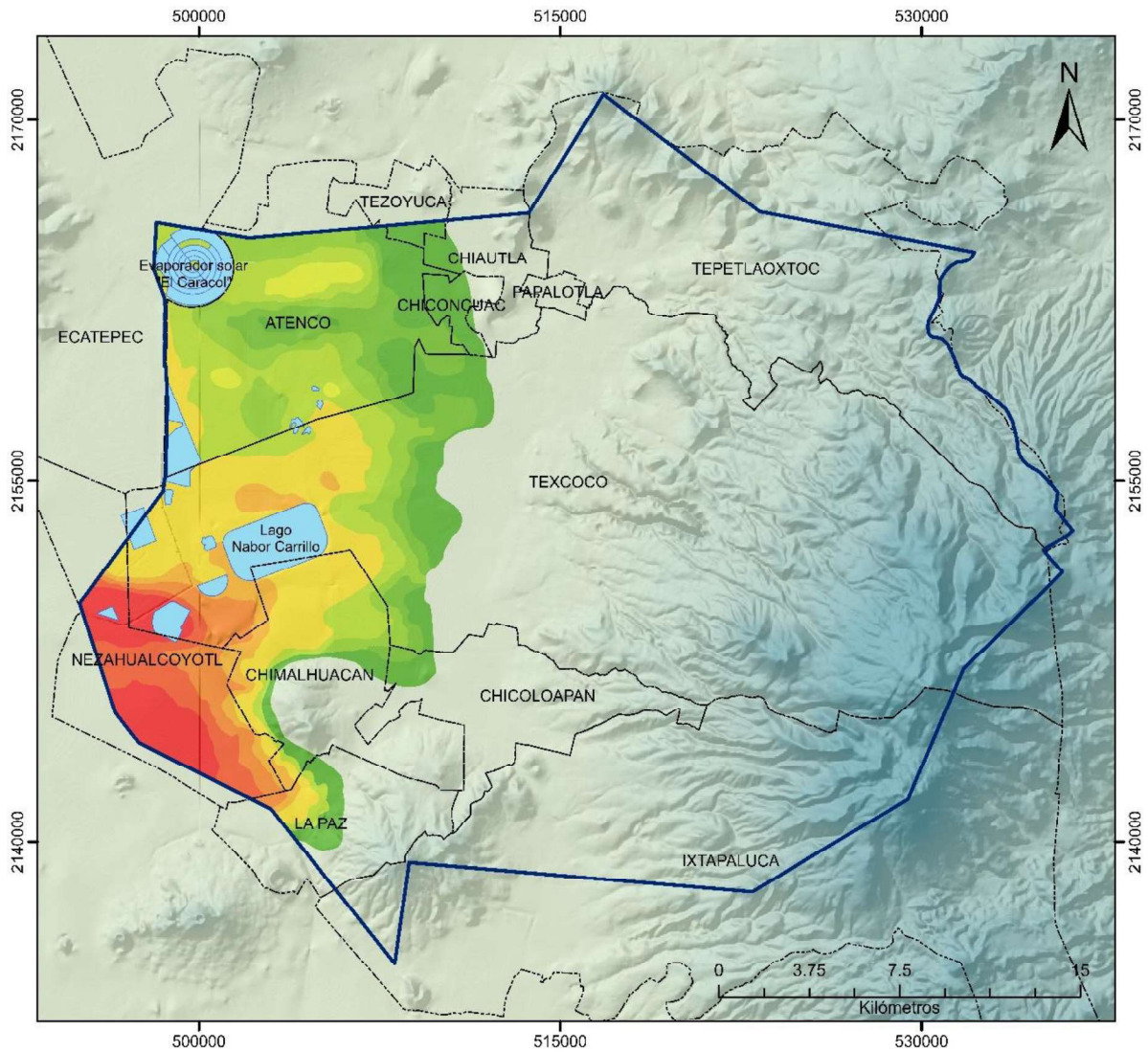
Una consecuencia directa del hundimiento regional que sufre el Valle de México como resultado del bombeo de agua de estratos profundos, es la aparición repentina de grietas. Las grietas ocurren principalmente cerca de la frontera entre depósitos compresibles y afloramientos de roca en la periferia del valle o alrededor de los promontorios rocosos dentro de la zona lacustre. La continua subsidencia hace que en estas zonas el gradiente de asentamiento diferencial y los esfuerzos de tensión en la superficie del terreno crezcan progresivamente hasta alcanzar un valor crítico que causa la fractura (Auvinet, et al., 2013). No obstante, no se ha determinado la profundidad que alcanzan tales fracturas hasta el momento; lo más probable es que cada una de ellas se extienda espontáneamente hacia

abajo hasta llegar a depósitos de suelos no cohesivos, pues estos colapsan por peso propio de forma tal que cierran cualquier grieta.

Por otra parte, en suelos cohesivos, las grietas se llenan de inmediato con agua de lluvia o de cualquier otra fuente, lo que produce un efecto de cuña hidráulica que extiende la fractura hacia abajo hasta encontrar materiales granulares sin cohesión que la sellan. Tales grietas constituyen una amenaza inminente de contaminación para los acuíferos que abastecen de agua potable a la población de todo el valle (Reséndiz, et al., 2016).

Gran parte del problema del agrietamiento del suelo se presenta en la planicie del Ex-Lago de Texcoco como ocurre en la carretera Peñón-Texcoco, y en diversas zonas, principalmente en los municipios Nezahualcóyotl y Chimalhuacán; y en las inmediaciones de los cerros Chimalhuacán, Peñón de los Baños, Peñón del Marqués, y en la Sierra Santa Catarina y Chichinautzin (Auvinet, et al., 2014).

Con respecto a los hundimientos regionales que afectan la zona del Ex-Lago de Texcoco, las tasas de hundimiento correspondientes al periodo 1999-2008, permiten apreciar que en dicho lapso la velocidad del hundimiento osciló entre 0 y 43 cm/año (Figura 2.18), concentrándose los mayores hundimientos en la zona del antiguo Lago de Texcoco, principalmente en el municipio de Nezahualcóyotl, Chimalhuacán, Atenco y al poniente de Texcoco (Auvinet, et al., 2017).



**SIMBOLOGÍA**

**Subsidencia (cm/año)  
Periodo 1999–2008**

0	18
3	23
7	27
11	32
15	43

Límite del acuífero Texcoco

Cuerpos de agua

Límite municipal

Figura 2.18. Mapa de velocidad de hundimiento en centímetros por año, periodo 1999-2008 (Auvinet, et al., 2017)

## 2.7. Población y desarrollo socioeconómico

El desarrollo histórico y económico del Valle de México ha ejercido un papel trascendental en el país, debido a su alto crecimiento industrial y poblacional, creando al mismo tiempo una demanda de agua significativa en las diversas zonas de la Cuenca del Valle México, lo que ha ocasionado, de forma continua en las últimas tres décadas, un incremento del número de captaciones de agua subterránea, con el consecuente aumento en los volúmenes de extracción y el desequilibrio del sistema hidrológico natural (DOF, 2019).

De acuerdo con los resultados del Censo de Población y Vivienda realizado por INEGI (2020), la población asentada dentro de los municipios que comprende el acuífero Texcoco es de 3,277,664 habitantes. Las localidades más pobladas dentro de los límites del acuífero Texcoco, son Ciudad Nezahualcóyotl, Chimalhuacán, Chicoloapan de Juárez, Texcoco de Mora, San Francisco Acuautla, La Magdalena Atlicpac, San Miguel Coatlinchán, Chiconcuac de Juárez, San Salvador Atenco, Santa María Tulantongo, San Sebastián Chimalpa, Lomas de San Sebastián, Santiago Cuautlalpan y Profesor Carlos Hank González.

En la Tabla 2.5 se muestra el crecimiento y distribución de la población que habita en los municipios comprendidos dentro del acuífero Texcoco, caracterizada por un importante incremento. Aproximadamente el 24 % de la población se ocupa en el comercio, el 20 % de la población se dedica a alguna actividad dentro de la industria manufacturera, el 7 % a la industria de la construcción; el 6 % a actividades propias del transporte, correos y almacenamiento; el 1.3 % al sector agrícola, forestal y ganadero, mientras que la demás población se dedica a los servicios educativos, profesionales, de apoyo a negocios, de salud y asistencia social, de esparcimiento y culturales, hoteles y restaurantes, financieros y de seguros, inmobiliarios, y actividades del gobierno (DOF, 2019).

El principal uso del agua subterránea del acuífero Texcoco, es el público urbano, ya que el 59 % del volumen total que se extrae del acuífero se destina para este uso (REPDA, 2019).



**Tabla 2.5.** Población de los municipios comprendidos en el acuífero Texcoco (INEGI, 2005; 2010; INEGI, 2015; 2020)

Municipio	Número de habitantes en los municipios comprendidos dentro del acuífero Texcoco, de acuerdo con la información de INEGI			
	Conteo 2005	Censo 2010	Conteo 2015	Censo 2020
Nezahualcóyotl	1,140,528	1,110,565	1,039,867	1,077,208
Chimalhuacán	525,389	614,453	679,811	705,193
Texcoco	209,308	235,151	240,749	277,562
Chicoloapan	170,035	175,053	204,107	200,750
La Paz	232,546	253,845	293,725	304,088
Ixtapaluca	429,033	467,361	495,563	542,211
Atenco	42,739	56,243	62,392	75,489
Tepetlaoxtoc	25,523	27,944	30,680	32,564
Chiconcuac	19,656	22,819	25,543	27,692
Chiautla	22,664	26,191	29,159	30,045
Papalotla	3,766	4,147	3,963	4,862
<b>Total</b>	<b>2,821,187</b>	<b>2,993,772</b>	<b>3,105,559</b>	<b>3,277,664</b>

# Capítulo 3. Marco Teórico

---

### 3.1. Composición química del agua subterránea

La composición química de las aguas subterráneas está controlada por muchos factores que incluyen la mineralogía de las rocas, las características del acuífero, el grado de confinamiento y vulnerabilidad del acuífero, la composición de la precipitación, el clima y la topografía (Abdurrahman & Gökhan, 2019), y también por las actividades antropogénicas. Estos factores se combinan para dar origen a diversos tipos de agua que cambian espacial y temporalmente. Ello explica la evolución química que sufre el agua subterránea a lo largo de las trayectorias de flujo en el subsuelo (Kumar, et al., 2009).

La composición química se determina a través de la medición de constituyentes químicos tales como los cationes: calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ), y los aniones: bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ); además de otros constituyentes minoritarios y traza (Custodio & Llamas, 1983). Las propiedades fisicoquímicas que caracterizan el agua son pH, temperatura, conductividad eléctrica y potencial redox.

Los aniones, cationes y elementos minoritarios y traza permiten clasificar al agua subterránea en familias; así como, identificar el tipo de rocas por donde ha fluido y que tipo de procesos hidrogeoquímicos se han llevado a cabo (Kumar, et al., 2009).

#### 3.1.1. Procesos hidrogeoquímicos

Desde su primer contacto con el medio geológico, el agua está sometida a una serie de procesos hidrogeoquímicos; los cuales van a controlar las características hidroquímicas del agua subterránea, además influirán en su calidad y le otorgarán una huella química. Ejemplos de procesos hidrogeoquímicos son la disolución, precipitación, intercambio iónico, reacciones de oxidación-reducción y meteorización de silicatos; los cuales se mencionan a continuación:

- **Disolución y precipitación de minerales**

La composición del agua subterránea depende en gran medida de procesos como la disolución y precipitación de minerales que implican cambios de fase de especies disueltas en el agua a especies precipitadas (Morán Ramírez, 2016). La salinidad aumenta progresivamente con el tiempo de permanencia del agua en el subsuelo ya que el agua disuelve o altera los minerales que encuentra (si tiene tiempo suficiente para ello) hasta que alcanza el límite marcado por la constante de equilibrio correspondiente. Una vez alcanzado este equilibrio ya no disolverá más ese mineral, y continuará disolviendo otros minerales con una constante más elevada hasta que de nuevo se alcance el equilibrio, y así sucesivamente (Custodio & Llamas, 1983).

El grado de disolución depende de la solubilidad del mineral, su concentración en agua, y de la presión y la temperatura que posea el medio circundante. Dentro de los minerales más solubles se encuentra la calcita, dolomita, yeso, halita y silvita; que sirven como fuente de aporte de iones mayoritarios; mientras que los silicatos y minerales menos solubles dan lugar a los iones minoritarios y elementos traza (Tóth, 1999).

La precipitación de minerales, hidrogeológicamente hablando, puede tener lugar por tres razones. La primera es por la existencia de reacciones con los minerales para formar precipitados. La segunda es por la variación en presión y temperatura, parámetros que afectan la solubilidad de algunos componentes químicos, y, por último, debido a la oxidación de la materia orgánica disuelta, dando lugar a compuestos menos solubles (Tóth, 1999).

- **Hidrólisis**

Los procesos de hidrólisis contribuyen en la formación de nuevos minerales. Esta reacción consiste en la descomposición de un mineral por los iones  $H_3O^+$  y/o  $OH^-$ . Estas reacciones pueden desarrollarse en el medio hidrotermal (durante la formación de un depósito mineral) o como procesos exógenos (bajo condiciones atmosféricas). El intemperismo de los silicatos, que constituyen el 80 % de los minerales que componen la corteza terrestre,

se debe fundamentalmente a las reacciones de hidrólisis, donde se liberan iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , entre otros (Appelo & Postma, 2005).

- **Adsorción, absorción e intercambio iónico**

La adsorción es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida), como los minerales y sustancias orgánicas. Esta fase sólida, al estar en contacto con el agua, atrae moléculas de agua o partículas con deficiente carga iónica. El proceso de absorción es aquel en el cual las moléculas o átomos de una fase interpenetran, casi uniformemente, en otra fase como puede ser los minerales arcillosos y las sustancias orgánicas (Morán Ramírez, 2016).

El proceso de intercambio iónico es un cambio de ciertas sustancias sólidas naturales que se caracterizan por estar electrónicamente desequilibradas y que logran la neutralidad rodeándose de iones. Los iones retenidos lo están muy débilmente (iones lábiles) y al entrar en contacto con una disolución acuosa pueden ser reemplazados, valencia a valencia, por otros iones del mismo signo (Custodio & Llamas, 1983).

Los minerales con mayor potencial de intercambio iónico son del grupo de las arcillas que son cambiadores catiónicos. La alúmina es cambiadora aniónica y los materiales orgánicos pueden ser aniónicos o catiónicos. Son catiónicos los ácidos húmicos, turba y lignito (Freeze & Cherry, 1979).

- **Reacciones de óxido-reducción**

Las reacciones de óxido-reducción son reacciones de intercambio de electrones entre una especie que los libera, mientras que otra incorpora estos electrones (Bustamante Ibáñez, 2017). La oxidación es importante en la zona no saturada ya que es en donde el agua posee la mayor cantidad de oxígeno disuelto, el cual va disminuyendo hasta alcanzar la zona saturada. El agua, por naturaleza, lleva consigo sustancias oxidantes y en el subsuelo hay especies reductoras, por lo que a medida que el agua atraviesa el medio a lo largo de su recorrido, ésta se va haciendo más y más reductora.

El proceso de reducción se produce en zonas con depósitos orgánicos, donde el oxígeno puede obtenerse por reducción de óxidos, sulfatos, nitratos, nitritos y ciertos gases, teniendo como resultado especies iónicas como  $S^{2-}$ ,  $NO_2^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  y algunos hidrocarburos (Tóth, 1999).

- **Procesos de mezcla**

Es la representación de cualquier mezcla dispersiva entre dos o más miembros extremos a lo largo de una línea de flujo, siendo estos miembros extremos, por ejemplo, aguas bombeadas de diferentes zonas hidrogeológicas (acuíferos, acuitardos) o agua superficial (lagos, ríos) mezclada con el agua subterránea. Los miembros extremos aportan diferentes fracciones de su composición química a las aguas de mezcla que se encuentran acotadas entre éstos (Morán Ramírez, 2016).

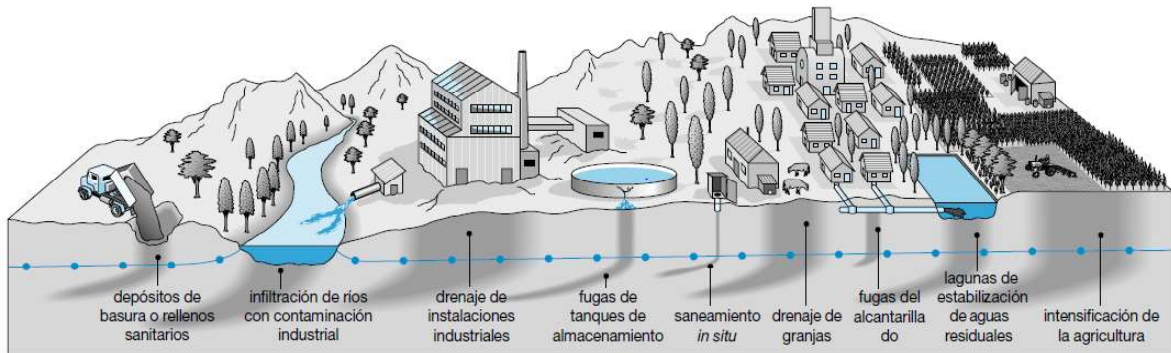
### **3.1.2. Contaminación del agua subterránea**

El agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento para diversos planes de desarrollo de infraestructura urbana e industrial, así como para tierras rurales y agrícolas. Este valioso recurso es la única fuente de agua potable en muchas partes del mundo (Taheri, et al., 2020).

Sin embargo, los acuíferos están experimentando una amenaza creciente de contaminación ocasionada por diversos focos potenciales de contaminación que generan un impacto, debido a que no son controlados adecuadamente y exceden la capacidad natural de atenuación del terreno y de los estratos subyacentes (Figura 3.1) (Foster, et al., 2006).

La calidad de las aguas subterráneas puede verse alterada por la introducción de sustancias asociadas a muy diversas actividades humanas. Los agroquímicos (fertilizantes y plaguicidas) utilizados en las prácticas agrícolas, los residuos líquidos o sólidos de la actividad industrial, la deposición no controlada de residuos sólidos urbanos y el vertido de aguas residuales urbanas son las principales fuentes de contaminación, pero también hay otros como las aguas procedentes de la minería, las fugas de hidrocarburos o las fosas sépticas (Morell & Renau Pruñonosa, 2019).

Algunas de las principales fuentes de contaminación y tipos de contaminantes que afectan la calidad del agua subterránea se presentan en la Tabla 3.1.



**Figura 3.1.** Fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea (Tomada de Foster, et al., 2006).

**Tabla 3.1.** Principales contaminantes que afectan la calidad del agua subterránea y fuentes asociadas de contaminación (Zaporozec, et al., 2002)

Tipo de contaminación	Fuente de contaminación	Tipo de contaminante
Difusa	Procesos geogénicos	Arsénico, fluoruro, fosfato, cadmio, hierro, plomo, zinc, cobre, cobalto y sulfuro.
	Actividad agrícola	Fertilizantes (orgánicos e inorgánicos): nitrato, amoníaco, cloruro, fosfato, y potasio. Patógenos fecales, salinidad y pesticidas.
Puntual	Saneamiento in situ	Nitratos, microorganismos fecales y trazas de hidrocarburos sintéticos.
	Industria	Metales pesados (Pb, Zn, Cd, Cr), arsénico, fenoles, productos y aditivos de petróleo, y alta DQO.
	Minería	Metales pesados, sales (cloruro, sulfato), pH bajo, alto SDT, cianuro, HAP, productos petrolíferos.
	Lodos residuales domésticos	Nitratos, varios hidrocarburos halogenados, plomo y zinc.
	Exploración y extracción de petróleo/gas	Salinidad (cloruro de sodio) e hidrocarburos aromáticos.
Lineal	Oleoductos	Productos petrolíferos
	Ríos y arroyos	Nitrato, amoníaco, hierro, manganeso, fenoles

En función del espacio se pueden distinguir los siguientes tipos de contaminación (Zaporozec, et al., 2002): areal o difusa, cuando el agente contaminante llega al medio físico de manera más o menos uniforme en una superficie extensa, como es el caso de los fertilizantes o los plaguicidas utilizados en agricultura; local o puntual, cuando se produce de manera localizada, como un vertedero de residuos o un cementerio; y finalmente, lineal, cuando se produce a lo largo de una estructura continua, como podrían ser las fugas a lo largo de una conducción deteriorada o el flujo hacia el acuífero desde un río perdedor.

La contaminación del agua subterránea puede ser muy difícil de detectar y puede no ser evidente hasta que el suministro de agua es afectado. Los contaminantes pueden tardar meses o años en migrar de la fuente contaminante a un receptor o hasta un punto donde puedan detectarse (Freeze & Cherry, 1979). El peligro de contaminación varía de un lugar a otro, ya que dependen de las características intrínsecas del medio acuífero y del tipo de contaminantes. Esto hace que en un acuífero se diferencien áreas más o menos susceptibles a la contaminación (Foster, et al., 2007).

### **3.1.3. Calidad del agua subterránea para diferentes usos**

La calidad del agua es una medida de las propiedades físicas, químicas y biológicas del líquido que resulta fundamental conocer para poder aprovechar adecuadamente y de forma segura el líquido (Peters, et al., 2009). Esta se determina mediante la caracterización física y química de muestras de agua y su comparación con normas y estándares de calidad.

Algunos de estos estándares utilizan parámetros que pueden medirse fácilmente, como la temperatura, conductividad eléctrica, turbidez, pH y oxígeno disuelto. Otras medidas se enfocan en los nutrientes, sólidos disueltos totales, metales pesados, patógenos y compuestos orgánicos. Con los valores de estos parámetros se puede identificar si el agua es idónea para los requerimientos de calidad asociados a un uso determinado (por ejemplo, consumo humano, para el uso agrícola o industrial) (UNDP, et al., 2000). Los estándares más importantes son los establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2004) para



el agua potable. En México se consideran los criterios para uso y consumo humano, establecidos en la norma mexicana NOM-127-SSA1-1994.

### 3.2. Monitoreo del agua subterránea

Los cambios en la cantidad y calidad del agua subterránea son procesos frecuentemente muy lentos que ocurren debajo del suelo y en grandes extensiones. Puesto que no es posible determinar estos cambios simplemente con un único recorrido breve de campo, es necesario utilizar redes de monitoreo e interpretar los datos obtenidos.

De acuerdo con Auge (2006) y Tuinhof, et al. (2006) el término monitoreo implica seguimiento y, por lo tanto, se refiere a mediciones y muestreos periódicos. En general, el monitoreo de agua subterránea tiene por finalidad establecer las características y el comportamiento hidrogeológico, así como sus posibles variaciones espaciales y temporales. Las propiedades comúnmente monitoreadas de los acuíferos son: calidad, productividad y reserva (Figura 3.2).

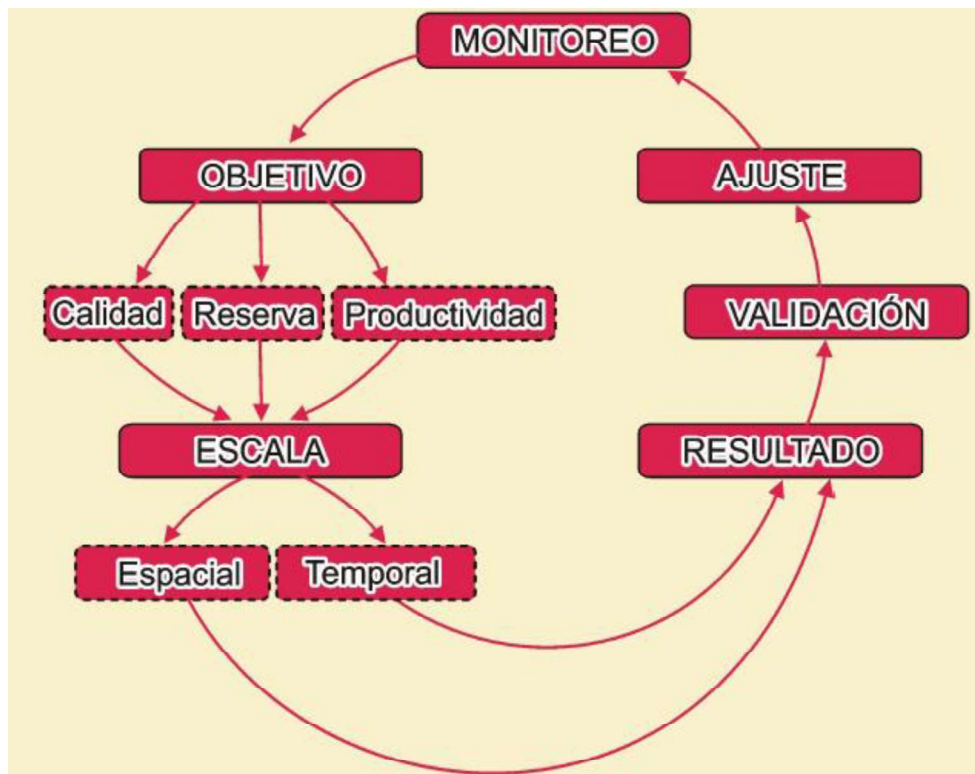


Figura 3.2. Ciclo del monitoreo del agua subterránea (Tomada de Auge, 2006)

El elemento para monitorear estará en función del objetivo de la investigación. Esta propiedad es analizada a partir de la escala espacial de trabajo, la cual permitirá representar espacial y temporalmente el comportamiento del elemento a monitorear (Esquivel Martínez, 2015), para ello, es imprescindible la definición de la escala de trabajo en toda investigación hidrogeológica, incluido el monitoreo (Auge, 2006) (Tabla 3.2).

**Tabla 3.2.** Clasificación de las redes de monitoreo según la escala espacial (Auge, 2006; Esquivel Martínez, 2015).

Escala	Clasificación	Área	Aplicación	Densidad
Mayor de 1:25000	Detalle	De algunas hectáreas a cientos de km <sup>2</sup>	Para ambientes específicos como zonas urbanas, regiones cultivadas y áreas industriales	1 pozo cada 0.4 km <sup>2</sup> a 4 km <sup>2</sup>
De 1:25000 a 1:100000	Semidetalle	De cientos a unos pocos miles de km <sup>2</sup>	Para cuencas hidrogeológicas y unidades acuíferas individuales	1 pozo cada 4 a 65 km <sup>2</sup>
De 1:100000 a 1:500000	Semiregional	De miles a centenas de miles de km <sup>2</sup>	Para ambientes o provincias hidrogeológicas	1 pozo cada 65 a 1500 km <sup>2</sup>
Menor de 1:500000	Regional	De miles a millones de km <sup>2</sup>	Para la gestión de acuíferos compartidos interprovinciales, interestatales y transfronterizos	1 pozo cada 1500 km <sup>2</sup>

De acuerdo con Tuinhof, et al. (2006) una red de monitoreo está constituida normalmente por un conjunto de pozos de observación y pozos de extracción. Además, estos autores clasifican a los sistemas de monitoreo en tres grupos principales, que no son mutuamente excluyentes (Tabla 3.3):

- Los sistemas primarios: detectan cambios generales en el flujo del agua subterránea y sus tendencias de calidad, con objeto de aportar el conocimiento científico necesario para entender el recurso agua subterránea.
- Los sistemas secundarios: evalúan y controlan el impacto de riesgos específicos del agua subterránea.

- Los sistemas terciarios: alertan de forma oportuna el impacto en el agua subterránea por contaminantes.

**Tabla 3.3.** Clasificación de los sistemas de monitoreo del agua subterránea (Tuinhof, et al., 2006)

Sistema	Función básica	Ubicación de pozos
Primario (Monitoreo de Referencia)	Evaluación del comportamiento general del agua subterránea: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Las tendencias resultantes de cambios en el uso del suelo y la variación climática.</li> <li>• Los procesos tales como recarga, flujo y contaminación difusa</li> </ul>	Zonas con hidrogeología y uso del suelo uniformes.
Secundario (Monitoreo de protección)	Protección contra impactos potenciales en: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aguas subterráneas que sean estratégicas.</li> <li>• Los campos de pozos o manantiales para abastecimiento público de agua.</li> <li>• La infraestructura urbana por el asentamiento del suelo.</li> <li>• El afloramiento del acuífero en sitios arqueológicos.</li> <li>• Los ecosistemas que dependen del agua subterránea.</li> </ul>	Alrededor de las zonas, instalaciones o sitios peculiares que requieran protección.
Terciario (Contención de la contaminación)	Alerta oportuna del impacto en el agua subterránea por: <ul style="list-style-type: none"> <li>• El uso agrícola intensivo del suelo.</li> <li>• Las industrias.</li> <li>• Los rellenos sanitarios y depósitos no controlados de basura.</li> <li>• Las zonas de recuperación de suelos.</li> <li>• Las minas y canteras.</li> </ul>	Inmediatamente gradiente arriba o gradiente abajo de la situación que presente el peligro.

### 3.2.1. Diseño de redes de monitoreo de la calidad del agua subterránea

La investigación y prevención de la contaminación es fundamental para una gestión eficaz de la calidad del agua subterránea, y adquirir datos de seguimiento a través de una red de monitoreo puede ayudar a desarrollar los futuros planes de gestión y protección de los recursos hídricos subterráneos (Ching Wu, et al., 2017).

El diseño de las redes de monitoreo de la calidad del agua subterránea consiste en definir los sitios y la frecuencia de muestreo (temporalidad) para determinar las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua subterránea (Briseño Ruiz, et al., 2011). El diseño óptimo de redes de monitoreo a largo plazo puede realizarse utilizando una variedad de

enfoques. La eficacia y ventajas de los enfoques y técnicas generales dependerán de varios factores, entre los cuales se pueden mencionar (DGA, 2019):

- Escala del programa de monitoreo (local, semiregional y regional)
- El objetivo del programa de monitoreo (ambiental, detección o monitoreo para la limpieza y restauración).
- El tipo de datos disponibles (hidrogeológicos, geológicos, calidad del agua subterránea, o química del agua subterránea).
- La naturaleza de los procesos contaminantes.
- El estado estacionario vs la naturaleza transitoria de las propiedades cualitativas del agua subterránea.
- Las metas cambiantes del programa de monitoreo a largo plazo.
- Las consideraciones institucionales y legales, entre otras.
- El rango de aplicación de los métodos para el diseño de las redes.

### **3.2.2. Enfoques para el diseño de redes de monitoreo de la calidad del agua subterránea**

Los enfoques metodológicos desarrollados durante las últimas dos décadas permiten realizar el análisis preliminar y el diseño de redes de monitoreo de la calidad del agua subterránea (ASCE, 2003). Loaiciga, et al. (1992) identifican los siguientes enfoques principales para el diseño de redes de monitoreo de aguas subterráneas:

1. El enfoque hidrogeológico que se basa en la información hidrogeológica cuantitativa y cualitativa. Se utiliza el término “enfoque hidrogeológico” para describir los casos en que la red de monitoreo se diseña con base en los cálculos y el juicio del hidrogeólogo sin el uso de métodos geoestadísticos avanzados.

Específicamente, el número y ubicación de los sitios de muestreo se determinan estrictamente por las condiciones hidrogeológicas cercanas a la fuente de contaminación tales como, por ejemplo, los confinamientos de desechos peligrosos.

2. El enfoque estadístico propone el análisis de datos dentro de un marco estadístico (métodos estadísticos) y define la red de muestreo basada en inferencias obtenidas de los datos. Algunos de los métodos que se han utilizado en el enfoque estadístico son los de estadística clásica, series de tiempo y geoestadística. Las ventajas y desventajas de cada uno de estos métodos dependen de factores tales como el objetivo del programa de monitoreo, la escala del programa, los datos disponibles, la naturaleza de los procesos investigados y los recursos disponibles.
3. El enfoque de modelación utiliza modelos matemáticos de flujo y transporte del agua subterránea para determinar posiciones y frecuencias de muestreo.

### 3.3. El análisis multicriterio en un entorno SIG

Durante las últimas décadas, muchos investigadores han comprobado que los métodos de análisis o evaluación multicriterio AMC (Multi-criteria Analysis) son herramientas eficaces para la elaboración de planes de gestión de recursos hídricos (Preziosi, et al., 2013; Esquivel Martínez, 2015; Rahmati, et al., 2015; Rivett, et al., 2018).

El proceso jerárquico analítico (*Analytical Hierarchy Process-AHP*) es uno de los métodos multicriterio ampliamente utilizado en el campo de los recursos naturales, ambientales y de administración. El método AHP basado en SIG ha sido propuesto como una eficaz herramienta para analizar problemas complejos de decisión espacial. La integración de AHP con SIG ha aumentado la solidez de este enfoque (Rahmati, et al., 2015; Taheri, et al., 2020).

El AHP fue desarrollado en la década de los 70 del siglo XX, por el matemático Thomas L. Saaty. Este proceso es un sistema flexible de metodología de análisis de decisión multicriterio discreta (número finito de alternativas u opciones de elección) (Muñoz & Romana, 2016).

Su método se basa en comparaciones por parejas de la siguiente forma: ¿Cómo de importante es el criterio  $C_i$  respecto al  $C_j$ ?, preguntas de este tipo se utilizan para establecer los pesos de los diferentes criterios y priorizar las alternativas. De esta forma, no sólo se

valora las diferentes alternativas, sino también se establece por comparaciones pareadas la importancia relativa de cada criterio respecto al resto, y establecer un vector de pesos.

El AHP permite de una manera eficiente y gráfica, mediante la construcción de un modelo jerárquico, organizar la información respecto de un problema de decisión, descomponerla y analizarla por partes, visualizar los efectos de cambios en los niveles y sintetizar (Cano Casas & Escobar Martínez, 2011).

La primera parte de método AHP consiste en establecer la jerarquía del problema de decisión. Para ello, se define el objetivo del problema de decisión en un primer nivel jerárquico, a continuación, los criterios y, en un último nivel, se establecen las alternativas o diferentes soluciones del problema (Muñoz Medina & Romana García, 2016).

Una vez construida la estructura jerárquica del problema se da paso a la segunda etapa del proceso de AHP: la valoración de los elementos (criterios y alternativas). Para lo cual, el decisor realiza la valoración de los criterios a través de comparaciones pareadas, y de igual forma, valora las diferentes alternativas respecto a cada criterio, es decir, el decisor tiene que emitir juicios de valor sobre la importancia relativa de los criterios y de las alternativas, de forma que quede reflejado la dominación relativa, en términos de importancia, preferencia o probabilidad, de un elemento frente a otro (Muñoz Medina & Romana García, 2016).

El AHP permite realizar las comparaciones pareadas basándose tanto en criterios cuantitativos como cualitativos, ya que para ellos se utiliza la escala propuesta por Saaty (Saaty, 1990). El decisor puede expresar sus preferencias entre dos elementos verbalmente y representar estas preferencias descriptivas mediante valores numéricos.

De esta forma, cuando dos elementos sean igualmente preferidos o importantes, el decisor asignara al par de elementos un "1"; "3" indica importancia moderada de un elemento sobre otro; "5", importancia fuerte de un elemento sobre otro; "7", importancia muy fuerte de un elemento sobre otro; y finalmente "9" indica extremadamente preferido o importancia de un elemento sobre otro. La escala verbal utilizada en el AHP permite al

decisor incorporar subjetividad, experiencia y conocimiento al proceso de decisión. Esta escala es justificada teóricamente y su efectividad ha sido validada empíricamente aplicándola a diferentes situaciones reales con aspectos tangibles para los que se ha comportado adecuadamente.

Por otra parte, el método AHP permite medir la inconsistencia global de los juicios emitidos, mediante el Grado de Consistencia (CR), que se expresa como el cociente entre el Índice de Consistencia (CI) y el Índice de Inconsistencia Aleatorio (RI) (Ecuación 3.1), y debe ser menor o igual a 0.10. Las matrices con puntajes CR mayores que 0.10 deben ser nuevamente evaluadas, hasta lograr un valor de CR menor e igual a 0.10.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.1)$$

El Índice de Consistencia (CI) mide la consistencia de la matriz de comparaciones (Ecuación 3.2):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.2)$$

Donde  $\lambda_{max}$  es el valor promedio del vector de consistencias, y  $n$  el rango de la matriz.

El Índice Inconsistencia Aleatorio (RI) es un índice de consistencia de una matriz aleatoria cuyos valores se detallan en la Tabla 3.4. Ello permite tener un nivel aceptable de confianza en que el proceso de decisión mediante comparaciones pareadas se haya realizado de forma correcta.

**Tabla 3.4.** Índice Inconsistencia Aleatorio (RI) (Muñoz Medina & Romana García, 2016)

Tamaño de la matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de inconsistencia aleatorio	0.00	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Este tipo de métodos de evaluación multicriterio se puede llevar a cabo en un SIG que trabaje en formato *raster* donde cada capa temática constituye una matriz cuadrículada de celdas continuas que poseen un tamaño y forma uniforme y un número con su color correspondiente que indica la categoría temática incluida en su interior. Cada celda se

conoce como píxel y es la unidad mínima de representación espacial (Buzai & Baxendale, 2015). Estas características permiten al formato *raster* ser susceptible a procesos matemáticos. Es por ello por lo que algunos de los mapas generados en formato vectorial deben ser rasterizados para poder aplicar el AHP.

El AHP en un entorno SIG es un proceso en el cual múltiples capas son agregadas para obtener un solo mapa de salida. Esta técnica se destaca por su capacidad de generar una decisión frente a un objetivo particular en un proceso en el cual múltiples productos cartográficos son considerados para obtener un único mapa de salida. Esta herramienta sirve de apoyo a la toma de decisiones ya que permite manejar e integrar gran cantidad de información espacial de manera eficiente. Una decisión es una elección entre alternativas posibles y la base para esa decisión se conoce como criterio (Celemín, 2014).

En una técnica AHP aplicada en los SIG existen dos tipos de criterios: restricciones (*constraints*) y factores (*factors*). El primero actúa como límite a las alternativas bajo consideración. Se expresan en forma booleana (binaria), donde las áreas excluidas o máscaras poseen el valor 0 y pueden corresponder al fondo no útil de la imagen, a categorías de uso de suelo incompatibles con la analizada o bien a las clases de variables significativas donde se comprueba la ausencia de dicha categoría. Por su formato binario al resto del área que no se encuentra enmascarada le corresponde el valor de 1 (Buzai & Baxendale, 2015).

Hajkowicz & Collins (2007) revisaron la aplicación de los métodos AMC en la gestión de los recursos hídricos e indicaron que el AHP está muy desarrollando y sigue creciendo. Chenini et al. (2010) demostraron que el análisis multicriterio basado en SIG tiene una buena funcionalidad para mapear la zona de recarga de agua subterránea. Como se mencionó anteriormente en la literatura consultada, la integración de los SIG con la metodología del análisis multicriterio se ha utilizado ampliamente en la elaboración de planes de gestión de recursos hídricos.



### 3.4. Casos de estudio sobre el diseño de redes de monitoreo de calidad del agua subterránea

A continuación, se presentan algunos trabajos que proponen métodos para el diseño de redes de monitoreo de calidad del agua subterránea, y que han utilizado el método del análisis multicriterio y los SIG.

Preziosi et al. (2013) propusieron un método que integra la vulnerabilidad de los acuíferos y los niveles reales de contaminación del agua subterránea en el diseño de la red de monitoreo de calidad. El mapa de vulnerabilidad fue utilizado como base para la evaluación de la densidad de los puntos de observación que constituyen la red. Los pozos se clasificaron de acuerdo con varios factores (caudal de bombeo, concentraciones de parámetros tóxicos, administrador, accesibilidad y estado de conservación) para seleccionar los más adecuados para el objetivo de la red. Se implementaron dos procedimientos de SIG (*point distance analysis* (PDA) y GRID+PDA) para seleccionar los pozos de monitoreo, evaluando los más confiables y con una densidad adecuada. Este estudio fue realizado en un área piloto en Italia central.

Esquivel Martínez et al. (2015) desarrollaron un método para el diseño óptimo de las redes de monitoreo del nivel piezométrico y calidad del agua subterránea, utilizando el análisis multicriterio para analizar y modelar los principales criterios que influyen en el diseño óptimo de las redes dinámicas de monitoreo en el Acuífero del Valle de Toluca (AVT), México. El análisis multicriterio se realizó mediante un SIG (IDRISI Selva), y utilizó el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para ponderar los factores (tasa de descenso de los niveles de agua subterránea, descenso de los niveles de agua subterránea, aumento de los niveles de agua subterránea, grietas, gradiente hidráulico vertical y densidad de pozos). Los resultados mostraron que los sistemas SIG y el enfoque AHP puede aplicarse con éxito en la identificación de áreas prioritarias de monitoreo y que el método propuesto puede ser utilizado por el gobierno y las organizaciones públicas y privadas para determinar estrategias de monitoreo que apoyen la gestión de los recursos hídricos.

Ching Wu et al. (2017) aplicaron un enfoque geoestadístico y un mapa de evaluación de riesgos para analizar la densidad de la red de monitoreo. Se calculó el índice de riesgo de contaminación superponiendo diferentes factores (uso de suelo, pendiente, densidad de población y suelo) con la ayuda de los SIG. Los resultados del mapa de riesgo mostraron la distribución espacial de los sitios con mayor riesgo potencial de contaminación. Se aplicó el método *Ordinary Kriging* (OK) para estimar tanto el número como la ubicación óptima de los pozos de monitoreo.

Rivett et al. (2018) desarrollaron un método para el diseño de redes de monitoreo de la calidad del agua subterránea, utilizando como caso de estudio el sistema acuífero del distrito de Chikwawa-Shire Valley en Malawi. El método se basa en el desarrollo de un modelo conceptual del sistema teniendo en cuenta los procesos hidrogeológicos-hidroquímicos y los datos procedentes de análisis químicos de los iones principales. Estos autores adoptan un enfoque variable y semicuantitativo que establece "objetivos de seguimiento" con base en monitorear el problema clave de la calidad del agua. Estos objetivos son el aumento de la salinidad, el tipo hidroquímico de agua subterránea, monitorear el con mayor uso de agua subterránea, la concentración probable de elementos/heterogeneidad, la amenaza antropogénica de urbanización en relación con los recursos, las interacciones agua subterránea-agua superficial y la cobertura espacial (o en profundidad) de la propiedad monitoreada. Los objetivos son ponderados en una escala de 1 a 5 y luego calificados en función de criterios personalizados utilizando una escala de 0 a 10. Esto permite el desarrollo de puntajes agregados de "potencial de monitoreo" en zonas con puntos de observación que serían puntos candidatos a integrar la red. El proceso se facilita con el uso de SIG. Los objetivos de seguimiento son flexibles y, normalmente, se relacionan con varios riesgos para la calidad del agua subterránea; incluyendo el aumento de la salinidad y la actividad antropogénica.

Taheri et al. (2020) utilizaron los SIG y el AHP para diseñar una red de monitoreo de calidad del agua subterránea en un acuífero aluvial ubicado en la provincia de Kermanshah, Irán. El modelo utilizó 8 criterios primarios (densidad de pozos, volumen de extracción de los pozos,

profundidad de los pozos, calidad del agua subterránea (conductividad eléctrica), dirección del flujo del agua subterránea, extracción anual de agua subterránea, descenso del nivel del agua subterránea y accesibilidad a carreteras) subdivididos en 5 subcriterios basados en una combinación de datos empíricos y opiniones de expertos. Los resultados mostraron que 59 de los 254 pozos de extracción en el acuífero podrían ser puntos de monitoreo óptimos. Una campaña inicial de muestreo de agua y análisis químico demostró que el diseño de la red cumplió con los objetivos de la agencia de gestión del agua de la región.

# **Capítulo 4. Materiales y métodos**

---

### 4.1. Proceso metodológico

El proceso metodológico que se siguió durante la investigación se presenta de forma esquemática en la Figura 4.1, y consta de cuatro etapas principales que a continuación se describen.

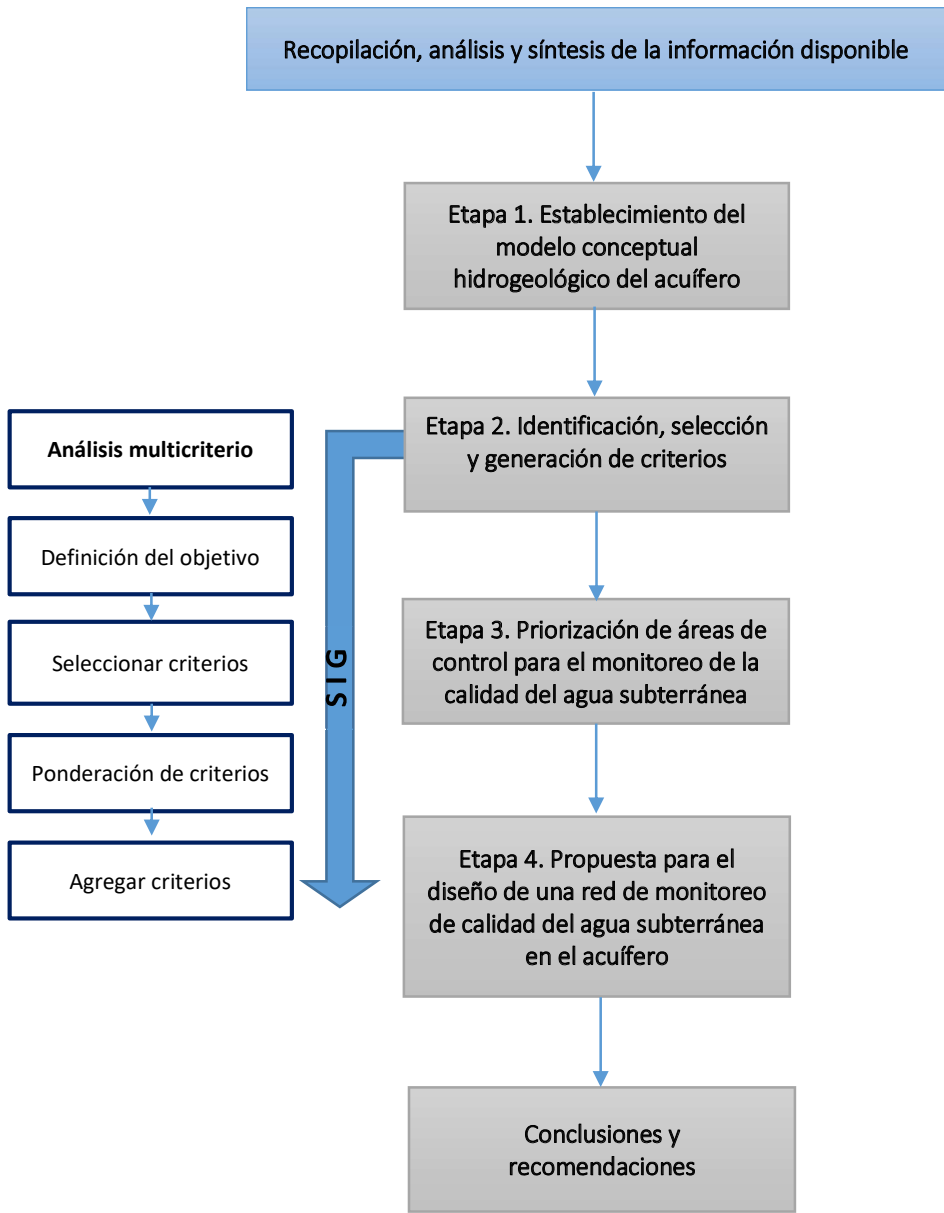


Figura 4.1. Diseño metodológico de la investigación

### **4.2. Recopilación, análisis y síntesis de información disponible**

Con la finalidad de alcanzar los objetivos propuestos, se realizaron una serie de actividades en campo y gabinete. El primer paso metodológico consistió en hacer una revisión, recopilación y síntesis de la información disponible sobre la temática, a través de organismos académicos e instituciones como el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); así como dependencias de gobierno como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM), la Comisión de Agua del Estado de México (CAEM), Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y el Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM).

La información sobre las características geológicas e hidrogeológicas, así como la relacionada con la climatología, usos de suelo, tipo de suelo, topografía y características socioeconómicas, se utilizó para entender e interpretar el funcionamiento general del acuífero. Fue necesario capturar, manejar y analizar la información; para ello se utilizaron los Sistema de Información Geográfica (SIG) para obtener así un resultado conforme al objetivo de la investigación.

### **4.3. Etapa 1: Establecimiento del modelo conceptual hidrogeológico del acuífero**

Con el objetivo de establecer el modelo conceptual hidrogeológico del acuífero se realizó una recopilación, análisis e integración de la información geológica e hidrogeológica disponible, así como la revisión de estudios de este mismo carácter, efectuados con anterioridad en el área de estudio.

Como primer paso se ubicó geográficamente el acuífero Texcoco en la cartografía del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) del año 2018, con escala 1: 50,000 y, posteriormente se llevó a cabo la recopilación de la siguiente información:

- **Climatológica:** datos climatológicos como precipitación, evaporación, temperatura, evapotranspiración, entre otros.
- **Topográfica:** planos topográficos y modelos digitales de elevación (MDE).
- **Geológica:** estratigrafía local y regional, unidades geológicas, y principales estructuras (fallas, fracturas).
- **Suelos:** tipos de suelo, uso de suelo y vegetación.
- **Hidrológica:** tipo de cuenca y densidad de drenaje.
- **Geofísica:** ubicación de los SEV (sondeos eléctricos verticales) realizados con anterioridad y sus resultados.
- **Hidrogeológica:** aprovechamientos hidráulicos con su respectiva ubicación, características constructivas de los pozos, unidades hidroestratigráficas y características hidráulicas de las rocas, piezometría, procesos de recarga y descarga e información hidroquímica.

Estos datos se recopilaron en organismos públicos, dependencias gubernamentales y universidades. La información se analizó y clasificó de acuerdo con el objetivo de la investigación, grado de detalle, fecha de edición y la confiabilidad para obtener un marco de referencia del área de estudio y así generar mapas, tablas y secciones.

El resultado del análisis e integración de la información antes mencionada permitió la identificación y caracterización de las unidades hidroestratigráficas permeables y de las unidades impermeables, la distribución de los puntos de agua (pozos de extracción), la dirección del flujo, las condiciones de recarga y descarga, las características hidrogeoquímicas y parámetros hidráulicos. Los pasos para la elaboración del modelo conceptual se presentan en la Figura 4.2.

Posteriormente, el modelo conceptual hidrogeológico fue representado gráficamente mediante el mapa hidrogeológico que permitió sintetizar las principales características hidrogeológicas, distribución de pozos de extracción, isopiezas, direcciones de flujo, datos hidroquímicos y parámetros hidráulicos. También se representó gráficamente mediante un

modelo 3D que permitió mostrar, en términos generales, el funcionamiento de los sistemas acuíferos en 3 dimensiones.

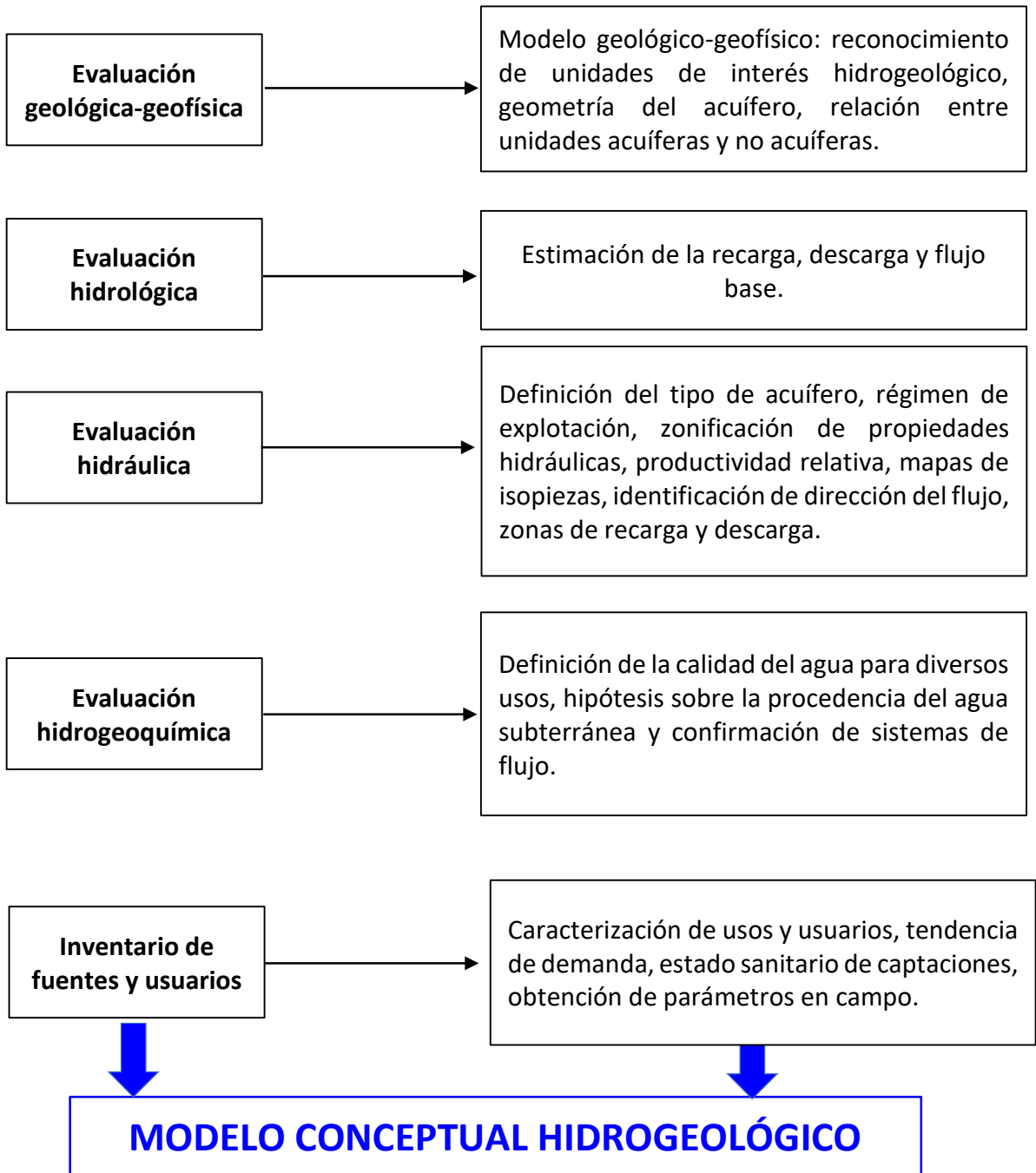


Figura 4.2. Diagrama de flujo para la elaboración del modelo conceptual hidrogeológico (Modificada de Vallejo López, et al., 2014)



#### 4.4. Etapa 2: Identificación, selección y generación de criterios para el diseño de una red de monitoreo de calidad del agua subterránea

La identificación consistió en establecer un listado de criterios que en otros estudios consultados se han utilizado para el diseño de redes de monitoreo de calidad del agua subterránea (Tabla 4.1). Se analizó y valoro cuales se podrían emplear en el diseño de la red de monitoreo de calidad del acuífero Texcoco.

**Tabla 4.1.** Identificación de criterios utilizados por diversos autores en el diseño de redes de monitoreo de calidad del agua subterránea

Criterios	Subcriterios	Justificación	Referencia
Nivel piezométrico y flujo	Dirección del flujo del agua subterránea	Es un factor importante en el transporte de contaminantes, ya que afecta el movimiento de contaminantes en el acuífero. Aunque la dirección del flujo en un mapa es una imagen gráfica basada en el cambio de elevación de la superficie potenciométrica y no representa todas las características del acuífero, puede ayudar a definir la distribución de los pozos de observación de manera significativa.	(Taheri, et al., 2020)
	Disminución del nivel del agua subterránea (descensos del agua subterránea)	La disminución del nivel del agua subterránea muestra el rango de cambios en las aguas subterráneas. Si se produce sobreexplotación en el acuífero, el cono de abatimiento aumentará de tamaño progresivamente. Este factor se fundamenta en que las áreas con mayor abatimiento son precisamente áreas con mayor prioridad de ser monitoreadas, ya que, al aumentar el tamaño del cono de abatimiento, existe la posibilidad de que llegue a una fuente contaminante e inducir una contaminación del agua subterránea.	(Taheri, et al., 2020)  (Esquivel Martínez, 2015)
	Gradiente hidráulico vertical	En la red de calidad, el gradiente hidráulico vertical representa un área que favorece un flujo descendente, por lo que son áreas más vulnerables a la contaminación y, por lo tanto, una entrada de contaminación podría afectar a los niveles productivos del acuífero.	(Esquivel Martínez, 2015)

**Tabla 4.1.** Identificación de criterios utilizados por diversos autores en el diseño de redes de monitoreo de calidad del agua subterránea (continuación)

Calidad del agua subterránea	Calidad del agua subterránea	Es un factor que incide en el diseño de redes de monitoreo cuantitativo y cualitativo y que impacta todas las decisiones de gestión del agua. Los factores geológicos u otros factores antropogénicos contaminantes que influyen en la calidad del agua puede alterar la cantidad de agua subterránea disponible para su uso.	(Taheri, et al., 2020)
	Concentraciones de parámetros tóxicos	Las concentraciones de parámetros tóxicos son un factor fundamental para monitorear la evolución de la calidad del agua con respecto a los contaminantes identificados, preferentemente en las zonas más propensas a la contaminación, identificadas por uso del suelo.	(Preziosi, et al., 2013)
	Hidroquímica	La hidroquímica del agua subterránea permite analizar el estado de la calidad de agua subterránea relacionada con las condiciones naturales, así como con los procesos contaminantes activos en la zona (impacto de las actividades antropogénicas).	(Rivett, et al., 2018)
Pozos de extracción	Densidad de pozos de extracción	En la red de calidad, la selección de este criterio se basa en el hecho de que las áreas con alta densidad de pozos de explotación podrían ser vías preferenciales de acceso de contaminantes al agua subterránea (falla constructiva). Es necesario que se monitoreen aquellas áreas que cuentan con una mayor densidad de pozos.	(Rivett, et al., 2018)  (Esquivel Martínez, 2015)  (Esquivel Martínez, 2011)
	Profundidad de los pozos	La profundidad de los pozos es importante en el diseño de redes de monitoreo de calidad, ya que aquellos pozos que son poco profundos pueden verse afectados por las actividades antrópicas que se desarrollan en la superficie del suelo, por otro lado, si existen descensos del nivel piezométrico los pozos poco profundos son más afectados que los pozos más profundos.	(Taheri, et al., 2020)

**Tabla 4.1.** Identificación de criterios utilizados por diversos autores en el diseño de redes de monitoreo de calidad del agua subterránea (continuación)

Pozos de extracción	Administrador, accesibilidad y estado de conservación	Este criterio se justifica en la seguridad para realizar la medición y muestreo (que sea propiedad pública, de fácil accesibilidad y que se encuentren en buen estado de conservación los pozos de extracción). Este criterio favorece los aspectos logísticos de la red de monitoreo.	(Preziosi, et al., 2013)
Volumen de extracción de agua subterránea	Caudal de bombeo de los pozos de extracción (l/s)	Este criterio se fundamenta en la importancia de los pozos de elevado caudal de bombeo (en función de otros factores como las características del acuífero), ya que estos pozos podrían verse afectados por las condiciones climáticas y operativas. Además, estos pozos podrían tener problemas de construcción y/o bombas que afecten su uso.	(Taheri, et al., 2020) (Preziosi, et al., 2013)
	Extracción anual de agua subterránea (Mm <sup>3</sup> /año)	La contaminación de las aguas subterráneas a causa de la explotación puede producirse de diversas formas, cuya consideración es importante para la red de calidad. El factor puede afectar la concentración de contaminantes en el acuífero y producir cambios en la calidad del agua.	(Taheri, et al., 2020)
Agrietamientos		En la red de calidad, la selección de este factor se justifica en que el área de grietas debe de ser monitoreada, ya que estas pueden comportarse como vías preferenciales de acceso de contaminantes al agua subterránea. Este factor puede crecer en área debido a la incidencia de los descensos de los niveles del agua subterránea y podría favorecer la posible contaminación de la misma.	(Esquivel Martínez, 2015) (Esquivel Martínez, 2011)
Subsidencia		Una consecuencia directa del hundimiento regional que sufren algunos lugares como resultado del bombeo de agua de estratos profundos, es la aparición repentina de grietas. Este factor se justifica en que las áreas con subsidencia son áreas potenciales para la generación de agrietamientos, por lo que son zonas interesantes ya que en el momento de producirse agrietamientos existe el riesgo de vías preferenciales de contaminación.	(Sánchez Hernández, 2013)

**Tabla 4.1.** Identificación de criterios utilizados por diversos autores en el diseño de redes de monitoreo de calidad del agua subterránea (continuación)

Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación		Este factor se fundamenta en la evaluación del grado (relativo) de protección natural de las aguas subterráneas debido al medio físico, también puede ser utilizado como base para la evaluación de la densidad de puntos de observación de la red de monitoreo de calidad del agua subterránea.	(Preziosi, et al., 2013)
Peligro de contaminación del agua subterránea		La selección de este factor se justifica en analizar las áreas consideradas como de mayor peligro de contaminación, ya que deben contar con una cobertura adecuada de puntos de monitoreo para identificar esa posible contaminación.	(Esquivel Martínez, 2015) (Esquivel Martínez, 2011)
Índice de riesgo de contaminación		Este criterio es importante para el análisis de la densidad de puntos de observación de la red de monitoreo, ya que la ubicación de los pozos de monitoreo se diseña de acuerdo con el Índice de Riesgo de Contaminación alto.	(Ching Wu, et al., 2017)
Uso de suelo		Este criterio se basa en determinar puntos representativos con condiciones de contaminación causada por el uso de suelo (Agrícola, Urbano, Industrial).	(Preziosi, et al., 2013)
Accesibilidad a carreteras		Técnicamente no tiene un impacto significativo en cómo se seleccionan los pozos, pero puede jugar un papel limitante en el costo de operar una red de monitoreo de aguas subterráneas.	(Taheri, et al., 2020)

#### 4.4.1. Aplicación del Análisis Multicriterio en el diseño de una red de monitoreo de calidad del agua subterránea

En esta investigación se empleó el análisis multicriterio con el apoyo de Sistemas de Información Geográfica (SIG). El método de toma de decisiones multicriterio que se utilizó fue el AHP (Proceso Analítico Jerárquico, *AHP Analytical Hierarchy Process*) para evaluar los diferentes criterios que son relevantes para la definición de áreas prioritarias de control para el monitoreo de calidad del agua subterráneas en el acuífero (Esquivel Martínez, 2015; Taheri, et al., 2020). El AHP realiza comparaciones binarias (por pares) y atribuye valores

numéricos a los juicios (preferencias) y, por último, asigna pesos o ponderaciones para cada criterio y las enlaza hasta la obtención de la imagen (mapa) que constituye la mejor decisión.

Como se puede observar en la Figura 4.1, los pasos metodológicos que se siguieron para aplicar el Análisis Multicriterio fueron (Saaty, 1990):

1. Definir el objetivo
2. Selección de criterios
3. Ponderación de criterios
4. Agregación de criterios

#### 4.4.2. Definición del objetivo y selección de criterios

El objetivo de la investigación se definió como “monitoreo”, y consistió en identificar las áreas prioritarias de control para el monitoreo de la calidad del agua subterránea. Posteriormente, la siguiente tarea fue la selección de criterios (factores y restricciones) basados en este objetivo.

Una vez identificados los criterios utilizados en el diseño de redes de monitoreo de calidad (Tabla 4.1); se definieron 4 criterios como los más relevantes y dos restricciones para el diseño de la red de monitoreo de calidad del agua subterránea (Tabla 4.2).

**Tabla 4.2.** Criterios seleccionados para el diseño de la red de monitoreo de calidad del agua subterránea del acuífero Texcoco (criterio (F) y restricción (R))

No.	Criterios	Disponibilidad	Fuente de información
1	Peligro de contaminación del agua subterránea (F)	✓	Elaboración propia con base en el mapa de vulnerabilidad y método POSH.
2	Abatimiento del nivel del agua subterránea (F)	✓	Elaborado a partir de la base de datos de piezometría (OCAVM, 2018).
3	Densidad de pozos de extracción (F)	✓	Elaborado con la base de datos de REPDA (REPDA, 2019).
4	Subsidencia (F)	✓	Tomado de la investigación realizada por Auvinet et al. (2017).
6	Cuerpos de agua (R)	✓	Tomado de IGCEM (2016)
7	Zonas montañosas (R)	✓	Elaborado a partir del modelo digital de elevación (MDE), INEGI (2015).

A continuación, se presenta la justificación de su selección:

- **Peligro de contaminación del agua subterránea**

El mapa de peligro de contaminación permite identificar las áreas con diferentes categorías de peligro, lo cual ayuda a inferir la mayor o menor probabilidad de contaminación del agua subterránea (Esquivel Martínez, 2011). La selección de este criterio se justifica en analizar las áreas consideradas como de mayor peligro de contaminación, ya que deben contar con una cobertura adecuada de puntos de monitoreo para identificar esa posible contaminación. Además, este factor incluye la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, que se considera importante en el diseño de redes de monitoreo de calidad, ya que, influye en la protección natural de las aguas subterráneas y en la probabilidad de que los contaminantes alcancen una posición específica en el acuífero después de su introducción (Preziosi, et al., 2013).

Para obtener el factor peligro de contaminación del agua subterránea fue necesario realizar la cartografía de vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación y, posteriormente, llevar a cabo la clasificación de focos potenciales de contaminación. Para lograr lo anterior se efectuaron los siguientes procesos:

- 1) **Elaboración de la cartografía de vulnerabilidad GOD**

La selección del método para evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea en un acuífero depende de varios factores, como la disponibilidad de la información, el número y calidad de los datos, los parámetros involucrados, el conocimiento y difusión del método y el alcance de la evaluación (Auge, 2008). El método seleccionado para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación fue el GOD, un método creado por Foster e Hirata en 1987 (Foster, et al., 2007). La selección de este método se basó principalmente en las características particulares del acuífero y en la disponibilidad de información de los parámetros involucrados.

Este método comprende tres parámetros: G, O y D; cuyos valores son asignados de acuerdo con la contribución en la defensa a la contaminación de las aguas subterráneas (Figura 4.3).

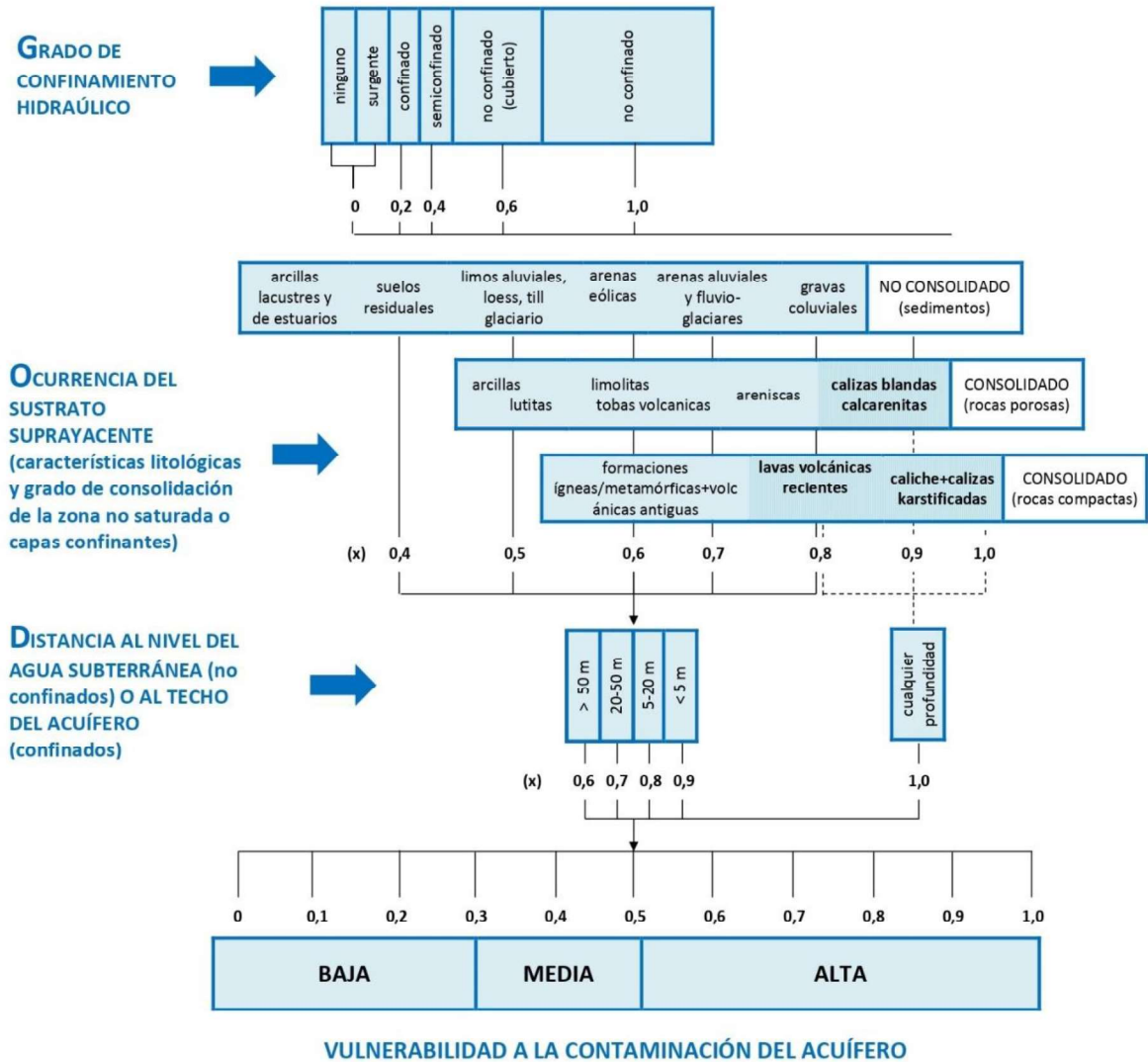


Figura 4.3. Metodología para la estimación del índice de vulnerabilidad GOD (Tomada de Foster et al., 2007)

La obtención de cada parámetro, así como los pesos y puntajes asignados a cada uno de ellos se describen a continuación.

#### I. Grado de confinamiento hidráulico (G)

El parámetro **G** (*Groundwater occurrence*, Grado de confinamiento hidráulico) está relacionado con el tipo de acuífero, y atendiendo a la presión a la que se encuentra el agua subterránea, su valor puede variar entre 0 y 1.0. El modo de ocurrencia varía entre la

ausencia de acuíferos (evaluado con valor 0) y la presencia de un acuífero libre o freático (evaluado con valor 1.0), pasando por acuíferos artesianos, confinados y semiconfinados.

El grado de confinamiento hidráulico del acuífero se determinó con base en la información geológica, geofísica, hidrogeológica y piezométrica disponible en el área de estudio (CONAGUA, 2006, 2018) así como del estudio “Modelo matemático de flujo del acuífero Texcoco” (Suárez Romero, 2019), donde se especifica el funcionamiento hidrogeológico del acuífero (unidades hidroestratigráficas).

### II. Ocurrencia del sustrato suprayacente (O)

El parámetro **O** (*Overall aquifer class*, Ocurrencia del sustrato suprayacente) responde al componente de la capacidad de atenuación del contaminante debido al sustrato sobreyacente al acuífero, en función del tamaño de granos o fisuras y a las propias características litológicas de los estratos. Los valores más bajos (0.4) corresponden a los materiales no consolidados, mientras que los más altos (0.8-1.0) corresponden a rocas compactas fracturadas o karstificadas.

La litología fue tomada del mapa geológico de CONAGUA (2018) a una escala 1: 50,000, el cual fue seleccionado debido a sus características, escala y año de elaboración, pero sobre todo a la verificación con estudios hidrogeológicos y geofísicos realizados anteriormente en el acuífero Texcoco. Una vez identificados los materiales geológicos, se le asignaron puntajes correspondientes a este parámetro.

### III. Profundidad del nivel del agua subterránea (D)

El parámetro **D** (*Depth*, profundidad del nivel del agua subterránea) se refiere a la profundidad del nivel freático en acuíferos libres o a la profundidad del techo del acuífero, en los confinados. Los valores más bajos (0.6) corresponden a acuíferos libres con profundidad del nivel freático mayor a 50 m; mientras que los índices altos (1.0) corresponden a acuíferos que, independientemente de la profundidad del nivel, se encuentran en medios fracturados. Para el caso de los acuíferos libres la profundidad del nivel estático está sujeta a la oscilación natural.



La evaluación de este parámetro es de gran importancia, ya que permite conocer la susceptibilidad de contaminación del agua subterránea, dependiendo de la profundidad a la que se encuentre, es decir, si las aguas subterráneas se encuentran a una profundidad menor, mayor será la probabilidad de recibir la carga contaminante y, por lo contrario, si las aguas subterráneas se encuentran a una profundidad mayor, la probabilidad de contaminación es menor, debido a que el agente contaminador tiende a degradarse en el transcurso de su transporte a través de la zona no saturada (Vargas Quintero, 2010).

Para determinar la profundidad del nivel del agua subterránea se utilizaron los datos de la red piezométrica del Valle de México, a cargo del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM) del año 2018; se ubicaron y seleccionaron los pozos localizados en el área de estudio que contaron con información.

La configuración de la profundidad del nivel estático del agua subterránea se obtuvo de 34 pozos que contaron con información (Tabla 2.2). Con los valores obtenidos de la profundidad de nivel, se realizaron interpolaciones en gabinete para obtener las isolíneas de profundidad que después se digitalizaron con ayuda del software ArcGIS v.10.4, y posteriormente fueron clasificadas de acuerdo con lo establecido por el método GOD, finalmente se obtuvo el mapa de profundidad del nivel del agua subterránea del acuífero Texcoco.

El índice de vulnerabilidad GOD se obtiene de multiplicar los valores asignados a cada parámetro, de acuerdo con la siguiente fórmula matemática:

$$iV_{GOD} = G . O . D \quad (4.1)$$

Para realizar la cartografía de vulnerabilidad GOD, se utilizaron las herramientas del software ArcGIS v.10.4. Se trabajó directamente con archivos tipo vector correspondientes a cada uno de los parámetros, a los cuales se les agregó un campo nombrado "Puntaje" donde se asignaron valores de acuerdo con las características establecidas por Foster, et al., (2007), para después ser convertidos en archivos tipo *raster* con los mismos límites geográficos e idénticas características en cuanto a sistema de referencia y tamaño de pixel

(50 m). Posteriormente, se multiplicaron los parámetros (Ecuación 4.1) mediante algebra de mapas.

### 2) Identificación y clasificación de focos potenciales de contaminación

Para la identificación y clasificación de focos potenciales de contaminación, se realizaron una serie de actividades en gabinete que permitieron localizar y estimar el efecto potencial nocivo de diversas fuentes existentes en el acuífero. El proceso metodológico que se siguió para tal fin consta de dos fases principales, las cuales son descritas a continuación.

#### I. Localización de los focos potenciales de contaminación

La primera fase consistió en la localización de los focos de contaminación para ello se elaboró una lista con los posibles focos considerados como las más comunes de acuerdo con Foster et al. (2007). Se identificaron once tipos de focos potenciales de contaminación:

1. Ríos
2. Minas
3. Industrias
4. Gasolineras
5. Cementerios
6. Zona urbana
7. Zonas agrícolas
8. Residuos sólidos
9. Cuerpos de agua
10. Canales y drenes de aguas residuales
11. Plantas de tratamiento de aguas residuales

Una vez determinada esta lista, se procedió a la localización espacial de cada uno de ellos, a través de la consulta de diversas fuentes de información. De esta manera, se identificaron focos como gasolineras, cementerios e industrias a través del *Google Earth* y Cartas topográficas. Las plantas de tratamiento se obtuvieron del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), que permitió obtener los datos vectoriales de las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales en operación del año 2018, en escala 1:250 000.

Las zonas urbanas y agrícolas fueron obtenidas a partir de una imagen satelital LANSAT-8 correspondiente al año 2018, la cual fue procesada en el software ArcGIS v.10.4. bajo la técnica de clasificación supervisada. El material de apoyo utilizado para la verificación de las coberturas fue la carta de uso de suelo elaborada por el INEGI en el año 2015 a una escala 1: 50,000 y la fotointerpretación de imágenes del *Google Earth*.

En cuanto a los sitios de disposición de residuos sólidos, canales, ríos y cuerpos de agua, se localizaron en las cartas topográficas del INEGI a una escala 1: 50,000, así como en la base de datos cartográficos del Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México (IGECEM). Finalmente, la ubicación de las actividades mineras se obtuvo del inventario realizado por el IFOMEGEM en el año 2014 y del IGECEM.

### **II. Clasificación de focos potenciales de contaminación**

La segunda fase consistió en la clasificación de los focos de contaminación identificados en el acuífero, la cual se realizó con la finalidad de asignar una medida cualitativa del efecto potencial nocivo que puede generar cada uno de ellos en el agua subterránea.

La clasificación del potencial de carga contaminante se realizó aplicando el método POSH (Foster et al., 2003) que permite clasificar la carga potencial nociva de los focos con base en los tipos de distribución: puntual, lineal y difusa.

#### *Clasificación de focos de contaminación de carácter puntual*

Los criterios establecidos por el método POSH para la clasificación de las fuentes de contaminación de carácter puntual, se muestran en la Tabla 4.3. Con base en estos criterios, y en las características propias del área de estudio, se clasificaron los focos de contaminación puntual presentes en el acuífero.

**Tabla 4.3.** Clasificación de fuentes puntuales de contaminación (Foster et al., 2007)

Potencial de carga contaminante al subsuelo	Disposición de residuos sólidos	Sitios industriales	Laguna de efluentes	Urbanas varias	Explotación minera y petrolera
<b>ELEVADO</b>	Residuos de industria tipo 3, residuos de origen desconocidos	Industria tipo 3, cualquier actividad que maneje > 100 kg de sustancias químicas	Todas las industrias tipo 3, cualquier efluente excepto aguas residuales residenciales si el área > 5 ha		Operación de campos de petróleo, minas metalíferas
<b>MODERADO</b>	Precipitación > 500 mm/a con residuos industriales/industriales de tipo 1/ agroindustriales y todos los otros casos	Industrias tipo 2	Aguas residuales residenciales si el área > 5 ha, otros casos que no figuran arriba o abajo	Gasolineras, rutas con tráfico regular de sustancias químicas peligrosas	Algunas minas/ canteras de materiales inertes
<b>REDUCIDO</b>	Precipitación < 500 mm/a con residuos industriales/industriales de tipo 1/ agroindustriales	Industrias tipo 1	Efluente residencial, urbano mezclado, agroindustrial, minero no metalífero si el área < 1 ha	Cementerios	

\*los terrenos contaminados por industrias abandonadas deberían tener las mismas categorías que las propias industrias:  
 Industrias tipo 1: carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, destilerías de alcohol y azúcar, procesamiento de materiales no metálicos  
 Industrias tipo 2: fábricas de caucho, pulpa y papel, textiles, artículos eléctricos, fertilizantes, detergentes y jabones  
 Industrias tipo 3: talleres mecánicos, refinерías de gas y petróleo, manufacturas de plaguicidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, curtidurías, fábricas de artículos electrónicos, procesamiento de metal

*Clasificación de focos de contaminación de carácter difuso*

Para clasificar los focos de contaminación por su carácter difuso se utilizaron los criterios establecidos por el método POSH, el cual determina la carga potencial contaminante de actividades agrícolas y zonas urbanas con base en sus características particulares (Tabla 4.4).

**Tabla 4.4.** Clasificación de fuentes difusas de contaminación (Foster et al., 2007)

Potencial de carga contaminante al subsuelo	FUENTES DE CONTAMINACIÓN	
	Saneamiento in situ	Prácticas agrícolas
<b>ELEVADO</b>	Cobertura del servicio de cloacas menor que 25 % y densidad poblacional de 100 personas/ha	Cultivos comerciales intensivos y la mayoría de los monocultivos en suelos bien drenados en climas húmedos o con baja eficiencia de riego, pastoreo intensivo sobre praderas altamente fertilizadas
<b>MODERADO</b>	Intermedio entre elevado y reducido	
<b>REDUCIDO</b>	Cobertura del servicio de cloacas mayor que 75 % y densidad poblacional de 50 personas/ha	Rotación de cultivos tradicionales, pastoreo extensivo, sistemas de granjas ecológicas, cultivos bajo riego de alta eficiencia en áreas áridas

### *Clasificación de focos de contaminación de carácter lineal*

Una situación relativamente común es la presencia de causas de aguas superficiales contaminados (permanentes o intermitentes) que presentan, a menudo, un peligro considerable de contaminación del agua subterránea subyacente y generan una significativa carga contaminante al subsuelo (Foster et al, 2007).

A partir del conocimiento general de los tipos de contaminantes presentes y las características hidrogeológicas, se puede establecer la gravedad de la carga contaminante al subsuelo.

### 3) Cartografía de peligro a la contaminación del agua subterránea

La cartografía de peligro de contaminación se obtuvo mediante la sobreposición del índice de vulnerabilidad (Método GOD) y el índice de la carga potencial contaminante de los focos (Método POSH), ello se realizó con base en la siguiente expresión:

$$P = (IVI) * (IF) \quad (4. 2)$$

Dónde:

**P** = peligro de contaminación

**IVI** = índice de vulnerabilidad intrínseca

**IF** = índice de carga potencial contaminante

Una vez obtenido el mapa de vulnerabilidad y el de la carga contaminante de los focos potenciales de contaminación, se generó una matriz que permitió asignar dos conjuntos de números para obtener así una cartografía en la cual se identifican áreas con peligro de contaminación: alto, moderado y bajo, representado en la Tabla 4.5.

De este modo, las zonas caracterizadas con valores de 6, representa un peligro de contaminación alto, y, por lo tanto, se necesitan implementar medidas urgentes para controlar y mitigar su efecto potencial nocivo; zonas con valores de 3 y 4 corresponden a un peligro de contaminación moderado; mientras que las zonas con valores de 1 y 2 son consideradas con peligro de contaminación bajo.

**Tabla 4.5.** Matriz para la clasificación del peligro a la contaminación del agua subterránea

<i>IF</i> \ <i>IVI</i>	Baja	Media	<i>IF</i> \ <i>IVI</i>	1	2
	Reducido	Bajo		Bajo	1
Moderado	Bajo	Moderado	2	2	4
Elevado	Moderado	Alto	3	3	6

**IVI:** índice de vulnerabilidad intrínseca  
**IF:** índice de carga potencial contaminante

• **Abatimiento de los niveles de agua subterránea**

La extracción del agua subterránea provoca que el nivel freático de un acuífero descienda dando lugar a un cono de abatimiento cuyo tamaño depende de las características hidrogeológicas del acuífero y de la cantidad de agua extraída por unidad de tiempo (Dávila Pórcel & De León Gómez, 2011). Si se produce sobreexplotación en el acuífero, el cono de abatimiento aumentará de tamaño progresivamente.

La selección de este factor se justifica en que dentro del área del acuífero se localiza una gran cantidad de pozos de extracción, lo que ha ocasionado el descenso de los niveles de agua subterránea. Las áreas con mayor abatimiento son precisamente áreas con mayor prioridad de ser monitoreadas, ya que, al aumentar el tamaño del cono de abatimiento, existe la posibilidad de que llegue a una fuente contaminante e inducir una contaminación del agua subterránea, y también se puede dar lugar al bombeo de agua más profunda y en consecuencia más antigua (agua con mala calidad) (CONAGUA, 2018).

El abatimiento del nivel piezométrico se obtuvo a partir de la información de pozos que contaron con datos de profundidad del nivel piezométrico en el periodo 1980-2018. Para realizar el cálculo del abatimiento, se tomó en cuenta la profundidad de los niveles de agua subterránea registrados en dos años diferentes, uno inicial y uno final (años 1980-2018). Se restó la profundidad del nivel del agua subterránea del año inicial ( $N_i$ ) y del nivel del año final ( $N_f$ ).

Se realizó la interpolación de isolíneas de abatimiento de forma manual con los valores de descenso obtenidos para el periodo 1980-2018. La elección de los intervalos se basó simplemente en obtener una representación cartográfica adecuada de la variabilidad de las zonas de mayor y menor abatimiento.

- **Densidad de pozos de extracción**

La selección de este factor se basa en que las áreas con alta densidad de pozos de explotación podrían ser vías preferenciales de acceso de contaminantes al agua subterránea (fallas constructivas), además es necesario que se monitoreen aquellas áreas que cuentan con una mayor densidad de pozos debido a que tiene mayor uso y la posibilidad de cambios cuantitativos y cualitativos del agua subterránea (Dávila Pórcel & De León Gómez, 2011).

Para obtener el criterio densidad de pozos, se utilizó una lista general de pozos de la base de datos de REPDA (REPDA, 2019) y esta lista se convirtió en un archivo .shp. La densidad de pozos fue calculada en el software ArcGis 10.4.1., siguiendo la metodología utilizada por Esquivel Martínez (2015); se definió el radio de búsqueda de acuerdo con la escala de trabajo y la cantidad de puntos a evaluar, ya que se especifica que a mayor radio será mayor la suavidad, y a menor radio se logrará mayor detalle.

Los puntos (pozos de extracción) que caen en el mismo radio de búsqueda se suman, luego se dividen por el tamaño del radio de búsqueda para obtener el valor de densidad de cada celda; las celdas que estén más cerca del centro del área de búsqueda tendrán una mayor densidad que aquellas que estén más cerca de los bordes.

- **Subsidencia**

La continua y excesiva extracción de agua subterránea puede llevar a la subsidencia del terreno, este problema se presenta en depósitos de sedimentos recientes arcillosos, a causa de la disminución de la presión intersticial o bien por colapsos locales en cavidades kársticas. Puede ser de extensión regional cuando es causada por bombeo muy excesivo y continuo de agua subterránea y combinado con el peso de las construcciones civiles (Auvinet, et al., 2016). También puede ser gradual, repentina o con la presencia de grietas,

que se deben al movimiento y deformación del material del subsuelo por extracción y descenso del agua subterránea (Dávila Pórcel & De León Gómez, 2011).

En este estudio, la selección de este factor se justifica en que las zonas con subsidencia tienen la probabilidad de sufrir agrietamientos. Una consecuencia directa de la subsidencia regional que sufre el Valle de México (donde se localiza el acuífero Texcoco) como resultado del bombeo de agua de estratos profundos es la aparición repentina de grietas, las cuáles pueden comportarse como vías preferenciales de acceso de contaminantes al agua subterránea (Martín del Campo, et al., 2014).

Por lo anterior, es importante identificar aquellas zonas con un mayor grado de subsidencia, ya que estos sitios son lo que presentan una mayor probabilidad de sufrir agrietamientos significativos en superficie y, por lo tanto, generar daños estructurales y aumentar la vulnerabilidad del acuífero ante la contaminación.

Se utilizó el mapa de subsidencia publicado por Auvinet et al. (2017) que muestra el ritmo de subsidencia en el periodo 1999-2008. Para la elaboración de este mapa se utilizaron datos recabados por el Sistema de Monitoreo del Hundimiento (Simoh), el cual incorpora la información histórica y reciente sobre piezometría y hundimiento del Valle de México. El mapa original cubre gran parte de la zona baja de la cuenca de México, sin embargo, para el presente estudio solo se digitalizó la zona correspondiente al acuífero Texcoco.

### **4.4.3. Proceso de ponderación mediante el método AHP**

Una vez seleccionados los criterios y generados sus mapas temáticos, el siguiente paso fue determinar el peso y la importancia relativa de cada criterio en la priorización de áreas de control para el monitoreo de calidad del agua subterránea. Para determinar el peso de cada criterio se realizó una encuesta a un grupo de diez expertos en el tema (investigadores del IITCA). El grupo estuvo integrado por hidrogeólogos y especialistas en sistemas de información geográfica.



Cada uno de los expertos realizó una comparación entre los criterios, lo cual permitió jerarquizar a los mismos. Se utilizó el AHP para comparar los diferentes criterios, primero se creó una matriz cuadrada (matriz de comparación) en la que el número de filas y columnas se definió por el número de criterios considerados en la toma de decisión. A cada elemento de la matriz se le asignó un valor comprendido entre 9 ("mucho más importante que"), 1 ("igual de importante que") y 1/9 ("mucho menos importante que"), en la escala de ponderación de Saaty (1990) que permite comparar la importancia de cada uno de los criterios en relación con los demás (Tabla 4.6).

Una vez que se tuvieron las matrices propuestas por los expertos, se analizaron y se realizó un promedio de los valores de cada factor, con el fin de generar una sola matriz.

**Tabla 4.6.** Escala de Saaty (1990) para la ponderación de criterios (Celemín, 2014)

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extrema	Muy fuerte	fuerte	moderada	Igual	moderada	fuerte	Muy fuerte	extrema
<b>Menos importante</b>					<b>Más importante</b>			

Después de obtener la matriz de comparación, el siguiente paso fue la normalización o estandarización de los criterios, para lo cual primero se realizó la suma de los elementos de cada columna y después fue necesario dividir cada elemento de la matriz entre la suma de sus columnas. El siguiente paso fue determinar el peso de cada criterio utilizando la media aritmética de cada fila. Al ser estandarizada, la suma de los promedios ( $W_i$ ) debe ser igual a 1.

Es necesario establecer si estos nuevos valores presentan un índice de consistencia aceptable. Para ello se determinó el vector de la suma ponderada que se obtiene multiplicando el peso del primer criterio de la matriz de comparación por el promedio ( $W_i$ ) del primer criterio, luego se multiplica el peso del segundo criterio por el promedio del segundo criterio y así sucesivamente.

Posteriormente, se determinó el vector de consistencia dividiendo el vector sumatorio de pesos por los pesos de los criterios determinados, con ello se obtiene el promedio de la suma de las consistencias, que permite obtener lambda ( $\lambda_{max}$ ) que al ser estandarizada genera el índice de consistencia CI.

Finalmente, se calculó el grado de consistencia “CR”. Según Saaty (1990), un valor de CR <0.10 indica un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas, mientras que un CR >0.10, indica inconsistencia en los juicios. La consistencia es definida como (Rahmati, et al., 2015):

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{4.3}$$

Donde **CI** es el Índice de consistencia, calculado como:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{4.4}$$

Donde  $\lambda_{max}$  es el valor promedio del vector de consistencias y **n** es el número de criterios usados en la toma de decisión, y **RI** es el Índice de aleatoriedad y se obtiene de la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7.** Índice de inconsistencia aleatorio en el análisis multicriterio (RI) (Muñoz Medina & Romana García, 2016)

Tamaño de la matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de inconsistencia aleatorio	0.00	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Para obtener los pesos normalizados de cada clase de los criterios ( $W_f$ ), se asignó un valor (rango) a las diferentes clases, dicho valor refleja el grado de importancia de cada clase dentro del criterio. Los valores considerados fueron de 1 a 4, posteriormente para cada criterio se realizó la suma de sus rangos y después se dividió cada rango entre la suma de los rangos de su criterio.

Los criterios y restricciones seleccionados fueron procesados con ayuda del software ArcGis 10.4.1. Los criterios se presentaron como capas temáticas en formato raster con los mismos límites geográficos e idénticas características en cuanto a sistema de referencia y tamaño de pixel, lo cual facilitó la evaluación entre los criterios.

#### 4.4.4. Agregación de criterios

Finalmente, para aplicar el análisis multicriterio se utilizó la herramienta suma ponderada del software ArcGis 10.4.1., ya que ofrece la posibilidad de ponderar y combinar varias entradas para crear un análisis integrado (Esri, 2020). Es similar a la herramienta superposición ponderada (combinación lineal ponderada “WLC” *Weighted Linear Combination*) dado que puede combinar fácilmente varias entradas de ráster, que representan varios factores, al incorporar pesos o importancia relativa.

En este caso se decidió utilizar la herramienta suma ponderada para trabajar con los pesos decimales y mantener la resolución del modelo e identificar la idoneidad de los sitios para establecer la red de monitoreo.

Para realizar la suma ponderada, se multiplicaron los valores de las clases designados para cada criterio por su peso correspondiente. Después, se sumaron todos los criterios para crear el mapa de áreas prioritarias de control. Esta operación se realizó de acuerdo con la siguiente fórmula matemática:

$$\text{Áreas prioritarias de control} = \sum_{w=1}^m \sum_{i=1}^n (W_j * X_i) \quad (4.5)$$

Donde  $W_j$  es el peso normalizado de cada criterio  $j$ ,  $X_i$  es el valor de rango de cada clase con respecto al criterio  $j$ ,  $m$  es el número total de criterios, y  $n$  es el número total de clases en un criterio.

El mapa final se obtuvo de la superposición de los cuatro mapas ponderados utilizando el comando de suma ponderada. Por último, este mapa se multiplico por las restricciones, para mostrar las áreas no adecuadas o excluidas.

Las restricciones se representaron en la forma de un mapa booleano (lógico), donde las áreas excluidas de la consideración se representan con 0 y aquéllas que están incluidas se representan con 1.

#### **4.5. Etapa 3: Priorización de áreas de monitoreo**

Con los mapas obtenidos del AHP y con ayuda del software ArcGis 10.4.1., se obtuvo el mapa de áreas prioritarias de control para el monitoreo de la calidad del agua subterránea en el acuífero. Los valores obtenidos de este mapa se clasificaron en tres categorías que fueron: baja (0.136-0.187), media (0.187-0.276) y alta (0.276-0.426) prioridad. Esta clasificación permitió identificar de forma más precisa las áreas con mayor prioridad de ser monitoreadas.

#### **4.6. Etapa 4: Propuesta para el establecimiento de una red de monitoreo de calidad del agua subterránea en el acuífero Texcoco**

Actualmente, el acuífero Texcoco no cuenta con una red de monitoreo de calidad propiamente definida para evaluar los impactos que está sufriendo, y que refleje exactamente la condición del agua subterránea.

Para establecer la red de monitoreo de calidad del agua subterránea del acuífero se consideraron los siguientes ítems:

- Áreas prioritarias de control (prioridad alta y media)
- Piezometría
- Dirección del flujo de agua subterránea
- Distribución espacial de los pozos (puntos de monitoreo)

Para obtener la distribución espacial de los puntos que conforman la red y determinar la densidad de pozos de monitoreo con los que debe contar el acuífero, se diseñó una malla. Cada cuadrícula en la malla corresponde al área que debe ser representada por un punto de monitoreo.

La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) recomienda para redes de monitoreo de calidad una densidad de aproximadamente un pozo por cada 20-25 km<sup>2</sup> de acuífero. Por otra parte, Auge (2006), Rentier et al. (2006) y Esquivel Martínez (2015) recomiendan un

pozo por cada 4 km<sup>2</sup> en investigaciones a escala semi detalle como es el caso de la presente investigación.

En este acuífero Texcoco para lograr una distribución espacial adecuada de los pozos (puntos de monitoreo), el área de cada cuadrícula en la malla fue de 5 km<sup>2</sup>. Esta área se definió considerando la escala de trabajo, las características del acuífero y las áreas prioritarias de control.

Con ayuda del software ArcGis 10.4.1. se construyó la malla y las cuadrículas fueron enumeradas con números y con letras (en orden alfabético) para facilitar la ubicación de los pozos en las cuadrículas.

Posteriormente, se utilizó una lista con los pozos que se detallan en la base de datos de REPDA. Esta lista se convirtió en un archivo .shp y a continuación los pozos se clasificaron según su uso.

Con la malla y la clasificación de pozos según uso, se sobrepusieron en el mapa de áreas prioritarias de control, agregando también la piezometría y la dirección del flujo subterráneo, ya que el agua subterránea al estar en movimiento de un punto a otro se enriquece en sales. Además, es importante considerar la dirección de flujo del agua subterráneo con relación a las fuentes potenciales de contaminación ya que, a medida que se desplaza el agua subterránea de aguas arriba hacia aguas abajo de las fuentes potenciales de contaminación, puede verse afectadas por la carga contaminante que puede emitir esa fuente de contaminación. IDEAM & INVEMAR (2018) recomiendan instalar pozos aguas abajo de las fuentes de contaminación para monitorear la calidad de agua directamente.

La sobreposición permitió seleccionar las cuadrículas que comprenden áreas de alta prioridad que requieren de puntos de monitoreo para evaluar los posibles impactos que está sufriendo el acuífero. En algunas cuadrículas no se ubicaron pozos y para que estas no se quedaran sin puntos de monitoreo (pozos) y para conseguir la distribución espacial adecuada, fue necesario considerar también las áreas con prioridad media dentro de las mismas cuadrículas con prioridad alta.

Por otro lado, para definir la composición química inicial del agua subterránea y distinguirla de la afectada por los impactos humanos, se seleccionaron algunas cuadrículas fuera de las áreas de prioridad con el fin de seleccionar pozos para el monitoreo de la línea de base de calidad.

El siguiente paso fue seleccionar los pozos para la red de monitoreo, para ello se generó una tabla para cada cuadrícula seleccionada en la que se registró los pozos que quedaron dentro de cada cuadrícula. En estas tablas se incluyó la siguiente información: uso del agua, ID de pozo, propietario y el caudal de explotación ( $m^3/año$ ), lo que ayudó al proceso de selección de pozos y a una mejor organización de estos. Al final se obtuvo una tabla general con los pozos seleccionados de cada cuadrícula.

La selección de pozos (puntos de monitoreo) se basó en el uso del agua. Se identificaron 3 tipos de uso: el público urbano, diferentes usos (doméstico, público-urbano, industrial, comercio y servicios) y el agrícola, teniendo la mayor prioridad los pozos de uso público urbano. En el caso de no encontrarse ningún pozo de uso público urbano dentro de la cuadrícula, se seleccionaron pozos de diferentes usos, y en la situación de no encontrarse ninguno de estos usos dentro de la cuadrícula, se seleccionaron pozos de uso agrícola.

La decisión de utilizar pozos de uso público urbano se basó en que al ser de propiedad pública se facilitan los permisos de acceso a ellos, por ello son los más factibles para realizar el monitoreo. En el caso de encontrarse más de un pozo, se eligió el de mayor caudal de explotación. Igualmente, se consideraron algunos pozos de diferentes usos que pertenecen a instituciones públicas que podrían facilitar el acceso para su monitoreo, como es el caso de los pozos pertenecientes a la Universidad Autónoma de Chapingo. Finalmente, se contempló la selección de los pozos de uso agrícola que suelen tener elevados caudales de bombeo y a los cuales también es relativamente fácil conseguir permisos de acceso.

En pozos con diferentes usos y agrícola, también se consideró para la selección, el pozo que tuviera mayor caudal de explotación. Esta misma lógica se aplicó para las cuadrículas con área de prioridad moderada. En la Figura 4.4 se muestra el árbol de toma de decisiones que se utilizó para realizar la selección de puntos de monitoreo (pozos).

Una vez seleccionados los pozos, se obtuvo un mapa con la localización de los pozos (puntos de monitoreo) propuestos para la red de monitoreo, clasificados por uso y por su ubicación en las áreas de prioridad. Finalmente, se obtuvo un mapa de la red de monitoreo de calidad propuesta para el acuífero Texcoco.

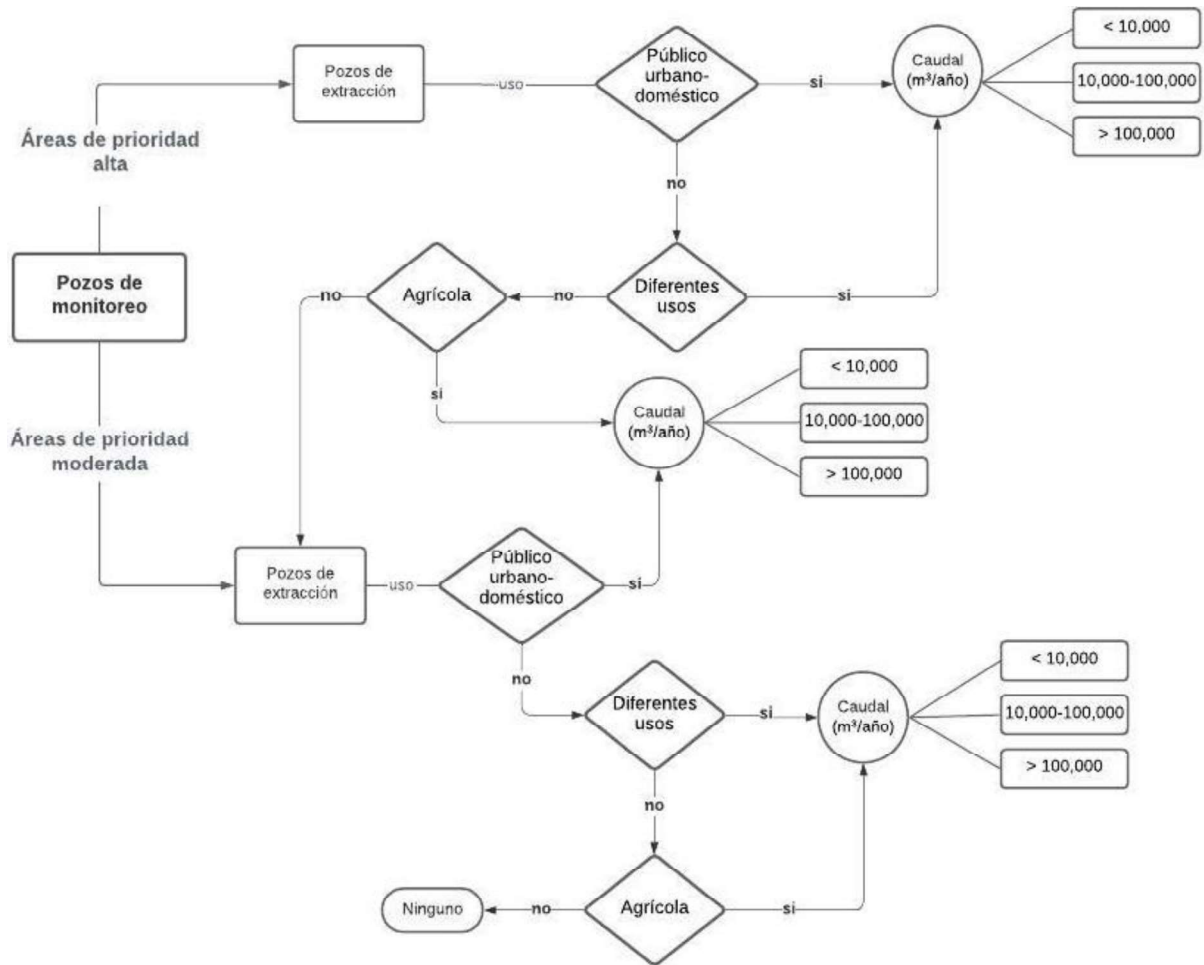


Figura 4.4. Árbol de decisiones para la selección de puntos de monitoreo (pozos) de la red de calidad del agua subterránea del acuífero

Una vez establecida la red de monitoreo se propuso la temporalidad de los muestreos y se definieron los parámetros físico-químicos a evaluar. Para determinar la temporalidad de monitoreo de calidad se consideró el funcionamiento hidrodinámico del acuífero y factores como el tipo de acuífero, flujo de agua subterránea y descenso en los niveles de agua subterránea.

Auge (2006), recomienda que los muestreos se hagan al finalizar el período de exceso en el balance hídrico y al finalizar el período de déficit. También, si la región tiene actividades agrícolas, el muestreo se debe de hacer en época de riego y otro en época de secas, para establecer si existen variaciones en la posición de la superficie freática y en la composición química del agua subterránea, derivada esta última, de la aplicación de fertilizantes y plaguicidas.

Los parámetros que se podrían analizar incluyen, como referencia, los considerados en la guía de calidad de agua potable de la OMS y los definidos en la "Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, para agua de uso y consumo humano" (NOM-127-SSA1-1994, 2005; OMS, 2004), pero, en la práctica, generalmente sólo se monitorea parte de ellos en forma permanente y periódica. Sin embargo, si inmediatamente después de un muestreo se detecta un cambio significativo en algún compuesto, se debe realizar un análisis más completo (Tuinhof, et al., 2006).

En la mayoría de los casos, el análisis se concentra en las principales especies de iones. En la Tabla 4.8, se presenta la lista de parámetros sugeridos para una red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas. Los parámetros a seleccionar también pueden ser identificados con base en estudios previos de hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea del acuífero Texcoco como son, por ejemplo, los realizados por CONAGUA (2006) y CONAGUA (2007), donde se señalan concentraciones problemáticas como resultado del régimen hidrogeoquímico natural y/o a causa de cualquier carga contaminante.



**Tabla 4.8.** Lista de parámetros sugeridos que se requieren para una red de monitoreo de calidad del agua subterránea (IDEAM & INVEMAR, 2018)

Grupo	Parámetro
<b>Parámetros descriptivos</b>	Temperatura, pH, OD, CE
<b>Iones mayoritarios</b>	Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
<b>Parámetros adicionales</b>	La elección depende de la fuente de contaminación local identificada
<b>Metales pesados</b>	Hg, Cd, Pb, Zn, Cu, Cr. La elección depende de la fuente de contaminación local identificada
<b>Sustancias orgánicas</b>	Hidrocarburos totales, hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos halogenados, fenoles, clorofenoles. La elección depende de la fuente de contaminación local identificada
<b>Pesticidas</b>	La elección depende de las prácticas locales, el uso del suelo y las detectadas en el agua subterránea
<b>Microbiológico</b>	Coliformes totales, coliformes fecales

# Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

---

### 5.1. Modelo conceptual hidrogeológico del acuífero

El sistema acuífero Texcoco está conformado por 6 unidades hidroestratigráficas (U1, U2, U3, U4, U5, U6). Hasta los 80 m de profundidad (dependiendo de la zona) se encuentra la U1 saturada con agua salada, producto de los sedimentos arcillosos saturados en salmueras, mientras que la U2 está saturada con agua dulce, representando la unidad que es explotada actualmente por pozos para satisfacer las necesidades de agua en la zona. La U3 corresponde al basamento hidrogeológico del acuífero principal, la cual comprende los depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno (Suárez Romero, 2019).

La U4 y U5 están representadas por las rocas volcánicas localizadas en zonas de mayor elevación correspondientes a áreas de recarga. Presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento que desaparece a profundidad. Finalmente, la U6, constituida por depósitos piroclásticos (tobas y lahares), representa una zona de recarga del acuífero principal (U2).

Los parámetros hidráulicos de estas unidades hidroestratigráficas abarcan un amplio rango de valores debido a la variabilidad litológica y geométrica de los depósitos (CONAGUA, 2012; CONAGUA, 2006; Suárez Romero, 2019). De acuerdo con CONAGUA (2006), se han establecido valores de transmisividad para el acuífero Texcoco que varían de  $2.2 \times 10^{-4}$  a  $40.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , mientras que el caso de la conductividad hidráulica se cuenta con valores que oscilan entre  $2.3 \times 10^{-6}$  y  $7.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ .

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo y el basamento hidrogeológico están representados por los sedimentos arcillosos y por las mismas rocas volcánicas cuando a profundidad desaparece su fracturamiento (CONAGUA, 2018).

De acuerdo con la configuración del régimen de flujo realizada en este estudio (Figura 2.14), la **recarga del acuífero** proviene de la infiltración de agua de lluvia en el valle y en las zonas montañosas de la porción oriente y sur del acuífero (a través de las unidades hidroestratigráficas U4, U5 y U6). Por otra parte, en el acuífero se presenta una recarga inducida proveniente de los retornos de riego y de fugas en el sistema de agua potable (CONAGUA, 2018; 2014).

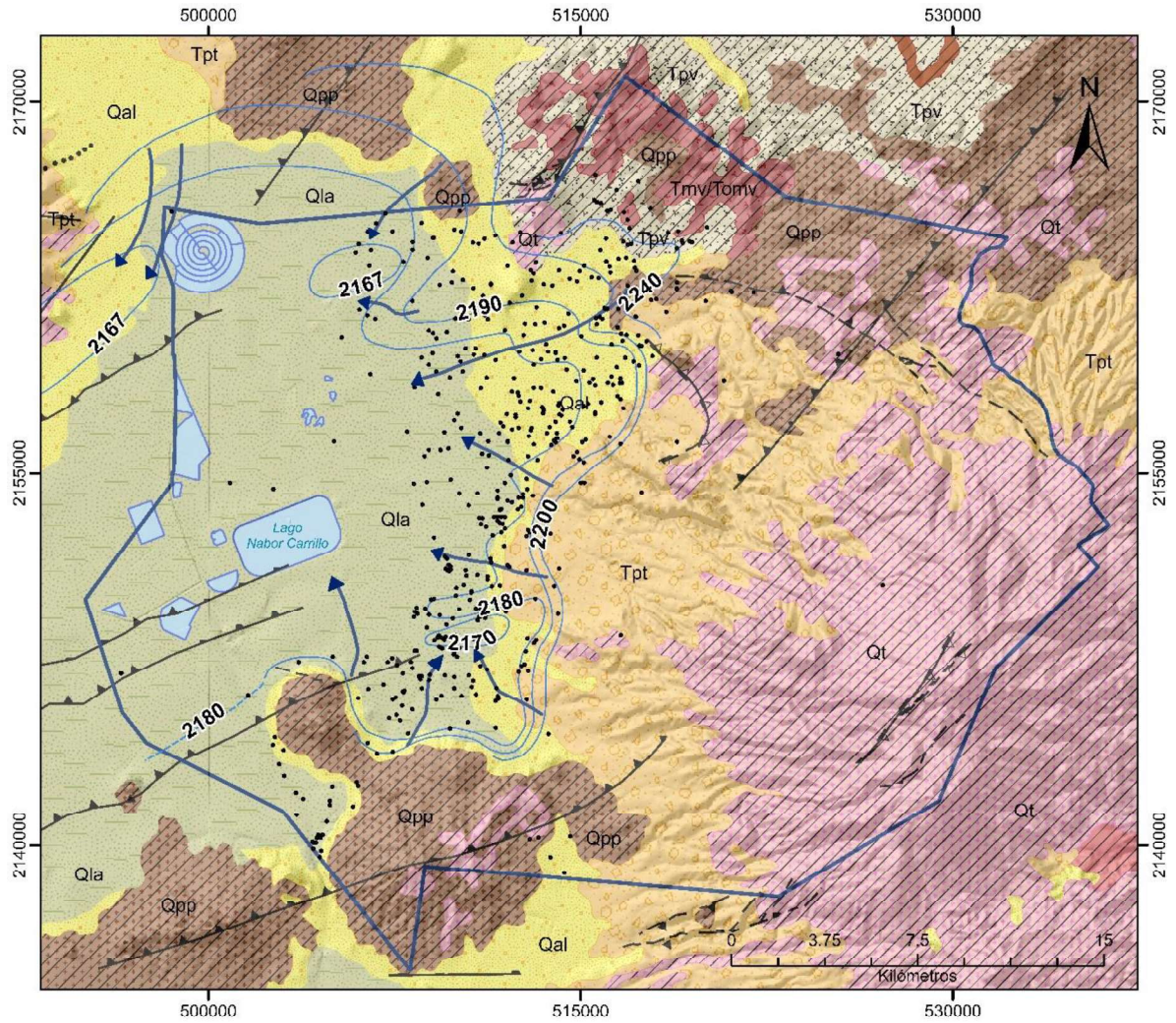
Las **salidas del agua subterránea** ocurren mediante la extracción por medio de pozos y por algunos manantiales ubicados en la porción oriental del acuífero. Esta información se obtuvo con el análisis del censo de aprovechamientos realizado en el año 2006. De igual forma, se analizó la base de datos del REPDA (2019) para conocer la ubicación de pozos y el volumen concesionado actual de agua subterránea (Tabla 2.3).

La principal zona de extracción por bombeo presenta descensos del nivel del agua subterránea de hasta 60 m en pozos ubicados en el municipio de Texcoco. De acuerdo con los 18 piezómetros analizados (Tabla 2.2), el ritmo de abatimiento promedio anual para el periodo 1969-2018 es de 1 m/año, llegando a 1.26 m/año en la localidad de San Bernardino, municipio de Texcoco.

Originalmente el acuífero (acuífero granular superior (U2)) se encontraba sometido a una condición de confinamiento total (CONAGUA, 2005); sin embargo, el comportamiento hidrogeológico del acuífero ha cambiado al de un acuífero de tipo libre, debido a la pérdida de carga hidráulica ocasionada por la excesiva explotación del agua subterránea.

Por otra parte, se considera una aportación al acuífero proveniente del acuitardo relativamente baja (proceso de goteo) debido a que el acuitardo arcilloso, que actúa como capa semiconfinante, cuenta con una muy baja conductividad hidráulica, y a que la mayoría de los pozos de extracción se encuentran ubicados fuera de la zona cubierta por el acuitardo arcilloso (CONAGUA, 2005; CONAGUA-Proyectos y Servicios, S.A de C.V., 2006).

El mapa hidrogeológico (Figura 5.1) sintetiza las principales características hidrogeológicas, distribución de pozos de extracción, piezometría y dirección del flujo subterráneo y en la figura 5.2 se muestra el modelo conceptual 3D del acuífero donde se observan los principales elementos que conforman al sistema acuífero Texcoco.



**SIMBOLOGÍA**

<b>Unidades hidroestratigráficas</b>		• Pozos de extracción
Medio poroso	Qal Depósitos aluviales	— Fracturas
	Tpt Depósitos aluviales y lahares	▲ Falla normal
Acuitardo	Qla Arcillas lacustres	▲ Falla inversa
	Qt Derrames andesíticos y dacíticos	2100 Isopiezas, 2018
Medio fracturado	Qpp Basaltos, andesitas o rocas dacito-riolíticas	2100 Isopiezas inferidas
	Tpv Depósitos volcánicos (tobas y rocas andesita-dacita)	↻ Dirección aproximada del flujo del agua subterránea
	Tmv/Tomv Rocas volcánicas ácidas (dacita)	☑ Cuerpos de agua
		☐ Límite del Acuífero Texcoco

Figura 5.1. Mapa hidrogeológico del acuífero Texcoco, año 2018

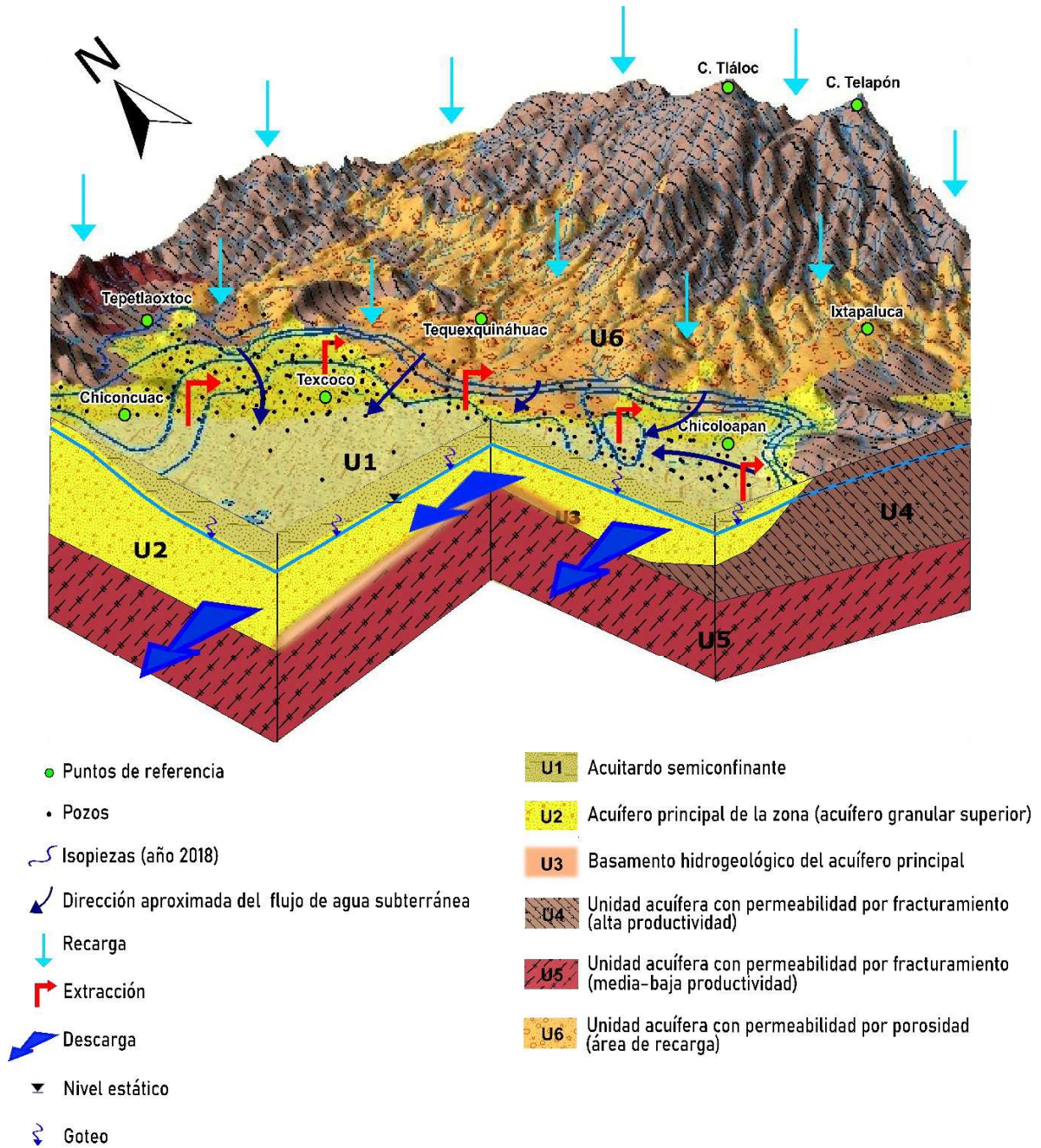


Figura 5.2. Modelo conceptual hidrogeológico 3D del acuífero Texcoco

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, el agua subterránea contenida en el acuitardo lacustre (U1) presenta grandes concentraciones de sólidos disueltos. Las concentraciones de STD varían entre 37,000 a 195,000 mg/L en la zona que ocupaba el Ex-Lago de Texcoco. En general, el agua subterránea contenida en el acuitardo lacustre se considera de muy mala calidad, al compararla con la Norma Oficial Mexicana para agua de uso y consumo

humano (NOM-127-SSA1-1994). Las menores concentraciones de salinidad se presentan en las zonas de recarga incrementándose hacia la zona de descarga que esta representaba por el Ex-Lago de Texcoco (CONAGUA, 2005; CONAGUA-Ariel Consultores, S.A., 2006; CONAGUA-Ariel Consultores, S.A., 2007; CONAGUA, 2018).

### **5.2. Aplicación del análisis multicriterio en el diseño de una red de monitoreo de calidad del agua subterránea**

#### **5.2.1. Identificación y selección de criterios**

Después del análisis de los criterios utilizados en otros estudios, y con ayuda de expertos en el tema, fueron seleccionados aquellos criterios que proporcionan la información adecuada para lograr el objetivo de *identificar aquellas áreas prioritarias de control para llevar a cabo un monitoreo de calidad del agua subterránea en el acuífero*. Los criterios seleccionados para el diseño de la red de monitoreo de calidad fueron los siguientes:

- Peligro de contaminación del agua subterránea
- Abatimiento del nivel del agua subterránea
- Densidad de pozos de extracción
- Subsistencia

Las restricciones para la red de monitoreo del acuífero fueron los cuerpos de agua y las partes altas del acuífero (montaña), ya que son áreas de difícil acceso y donde son muy escasas las actividades de extracción del agua subterránea.

La selección de estos criterios se basó principalmente en que son aquellos que afectan la calidad del agua subterránea, en la disponibilidad de datos en el área de estudio, la factibilidad de obtenerla, y en la consulta a un grupo de expertos en el tema (investigadores del IITCA).

A continuación, se describen y se presentan los resultados cartográficos de los criterios seleccionados en este estudio:

### 1. Peligro de contaminación del agua subterránea

#### 1.1. Cartografía de vulnerabilidad GOD

El conocimiento y establecimiento del modelo conceptual del acuífero permitió conocer el funcionamiento del sistema acuífero, así como seleccionar el método más conveniente para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero. A continuación, se muestran los resultados obtenidos al aplicar el método GOD.

- Grado de confinamiento hidráulico del acuífero

El grado de confinamiento hidráulico del acuífero se determinó a partir de la información geológica, geofísica, hidrogeológica y piezométrica de CONAGUA (2006 y 2018) y de Suárez Romero (2019), de donde se establecieron las siguientes unidades hidroestratigráficas:

**U1:** esta unidad funciona como un acuitardo confinante o semiconfinante de muy baja permeabilidad, conformado por arcillas muy deformables, intercaladas con lentes o estratos arenosos y limo arenosos de ceniza y vidrio volcánico delgados (Q1a).

**U2:** esta unidad se encuentra totalmente saturada y corresponde al acuífero principal de la zona (acuífero granular superior), formado por material areno-gravoso, esto es, piroclastos y conglomerados de origen volcánico intercalado ocasionalmente con lentes arcillosos, derrames volcánicos y capas de ceniza (Q1a).

**U3:** esta unidad constituye el basamento hidrogeológico del acuífero principal, compuesto por depósitos piroclásticos, calizas lacustres y margas; compacto y de baja a nula permeabilidad (Tppc).

**U4:** unidad acuífera de alta productividad con permeabilidad por fracturamiento, en rocas volcánicas localizadas en zonas de mayor elevación correspondientes a la zona de recarga; conformada por tobas cristalinas, vítreas, líticas y pumíticas intercaladas con derrames lávicos y autobrechados (Qt, Qpp, Tpv).



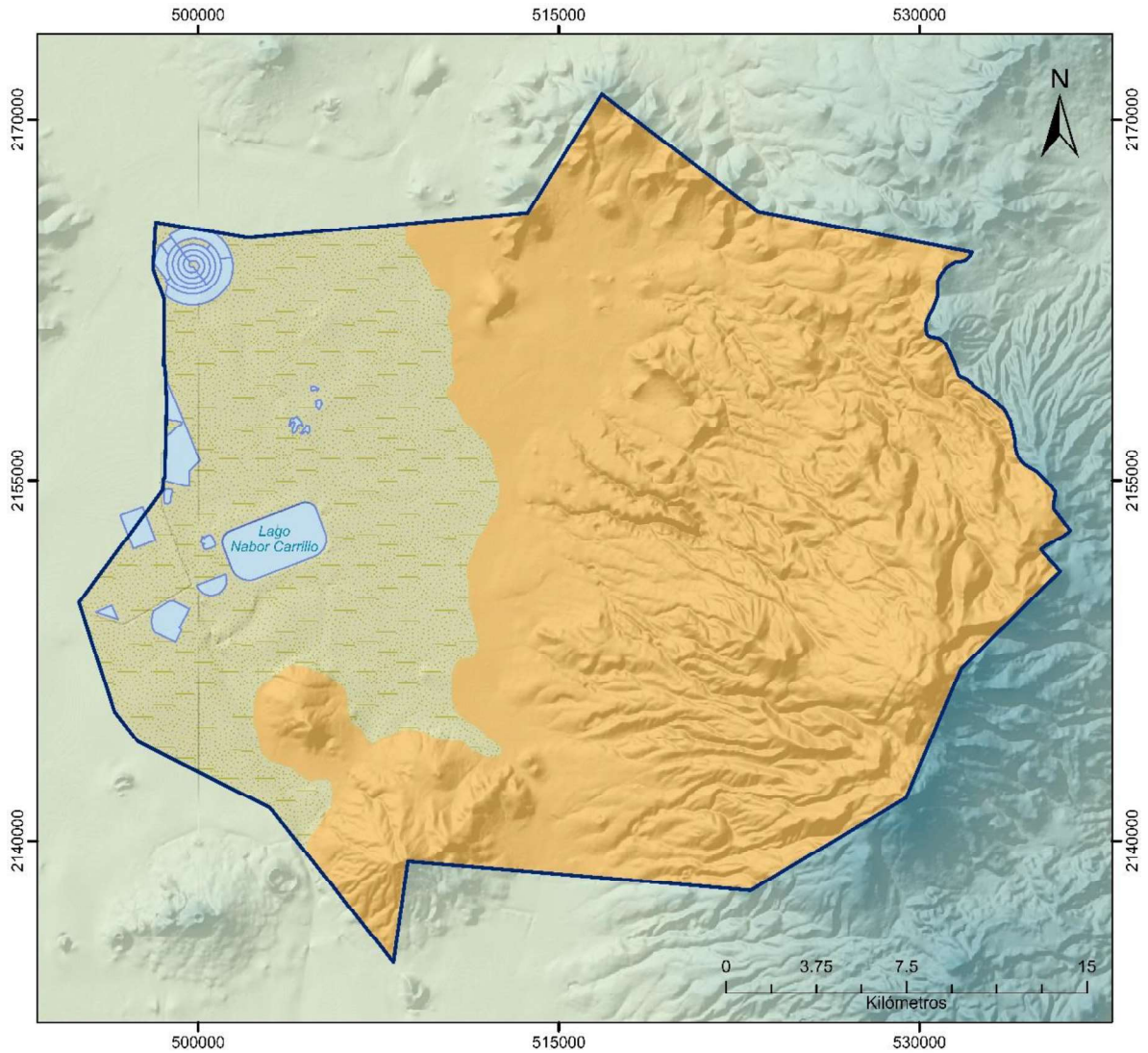
**U5:** esta unidad representa a las vulcanitas más antiguas del Oligoceno Tardío – Mioceno, localizadas en zonas de mayor elevación; sus derrames masivos le confieren de media a baja productividad, con permeabilidad por fracturamiento (Tmv, Tomv).

**U6:** corresponde a la unidad por la cual se infiltra el agua superficial que recarga al acuífero en los pies de todas las elevaciones de la Sierra Nevada, Sierra de Guadalupe y la Sierra de las Cruces; constituida por depósitos piroclásticos (Tpt).


Bajo estas características se consideró (Figura 5.3):


- **Acuitardo semiconfinante:** corresponde al acuitardo lacustre (U1), que constituye un medio poroso de muy baja permeabilidad.
- **Acuífero No confinado:** corresponde a la unidad hidroestratigráfica U2 (acuífero granular superior), y las unidades U4 y U5 que constituyen una unidad acuífera de alta a baja productividad con permeabilidad por fracturamiento, en rocas volcánicas.

Los valores determinados del puntaje GOD para el acuífero Semiconfinado y No confinado son 0.4 y 1.0, respectivamente.





**SIMBOLOGÍA**

 Límite del acuífero Texcoco

 Cuerpos de agua

**Grado de confinamiento      Puntaje GOD**

 Semiconfinado      0.4

 No confinado      1.0

**Figura 5.3.** Mapa del grado de confinamiento hidráulico del acuífero Texcoco (Elaborado con base en la información de CONAGUA (2007 y 2018) y Suárez Romero (2019))

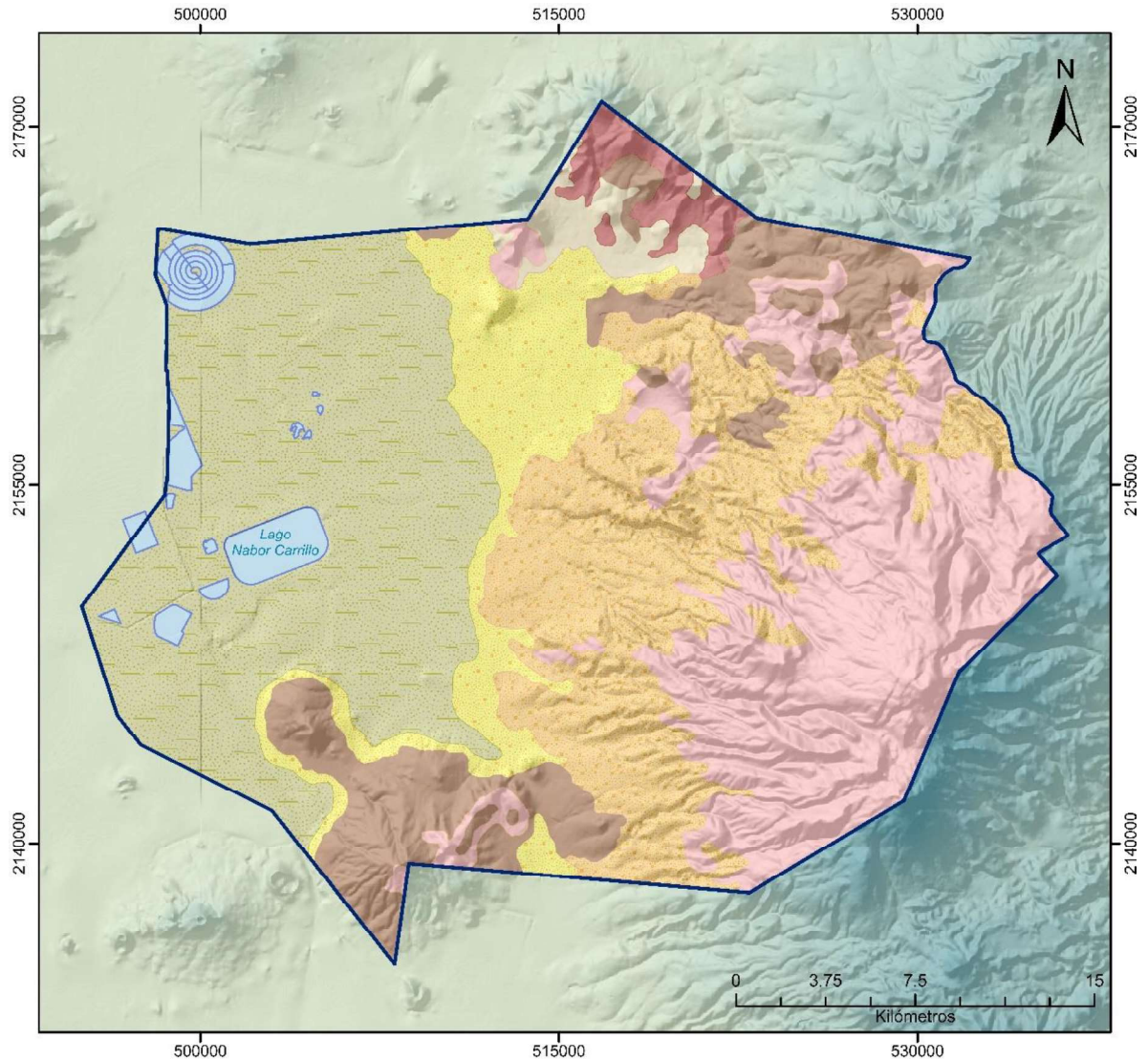
- Ocurrencia del sustrato suprayacente

La ocurrencia del sustrato suprayacente representa el tipo de roca, origen y su grado de consolidación en función del tamaño de granos o fisuras, y las propias características litológicas de los estratos. El valor más bajo (0.4) corresponde a los materiales no consolidados (sedimentos), determinados para las arcillas lacustres, mientras que los valores más altos (0.6-0.8) corresponden a los materiales consolidados (rocas porosas, rocas compactas, rocas volcánicas recientes y antiguas, y rocas volcánicas fracturadas).

En la Tabla 5.1 se muestran los valores correspondientes al tipo de roca y grado de consolidación de las unidades geológicas del acuífero. Una vez clasificadas de acuerdo con el método GOD, se obtuvo el mapa de ocurrencia del sustrato suprayacente (Figura 5.4).

**Tabla 5.1.** Puntajes asignados al sustrato suprayacente **(O)** del acuífero Texcoco

No.	Clave	Tipo de roca	Origen	Grado de consolidación	Puntaje GOD
1	Qla	Arcillas lacustres	Depósitos de rocas sedimentarias como los depósitos lacustres	No consolidado (sedimentos)	0.4
2	Tmv/ Tomv	Rocas volcánicas ácidas que forman domos, conos y calderas	Rocas volcánicas del Mioceno-Tardío	Consolidado (rocas compactas)	0.6
3	Qal	Depósitos aluviales. Arenas, gravas, limos y arcillas	Acumulación de depósitos de tipo clástico fluvial relacionados con periodos glaciares y postglaciares del Pleistoceno-Holoceno	No consolidado	0.7
4	Tpv	Basaltos	Depósitos volcánicos del Plioceno temprano	Consolidado (rocas compactas)	0.7
5	Tpt	Depósitos aluviales y lahares, intercalados con piroclastos, ceniza, grava, arenas. Formación Tarango	Depósitos de pie de monte del Pleistoceno superior	Consolidado (rocas porosas)	0.7
6	Qpp	Basaltos, andesitas o rocas dacito-riolíticas	Rocas ígneas extrusivas (lavas volcánicas recientes)	Consolidado (rocas compactas)	0.8
7	Qt	Derrames andesíticos y dacíticos. Asociados con piroclastos, tobas, brechas, bombas y lapilli	Rocas ígneas extrusivas. Derrames lávicos y autobrechados	Consolidado (rocas compactas)	0.8



**SIMBOLOGÍA**

**Grado de consolidación**

	No consolidado-sedimentos
	Consolidado-rocas compactas
	No consolidado-sedimentos
	Consolidado-rocas porosas
	Consolidado-rocas compactas
	Consolidado-rocas compactas
	Consolidado-rocas compactas

**Puntaje GOD**

0.4
0.6
0.7
0.7
0.7
0.8
0.8

- Límite del acuífero Texcoco
- Cuerpos de agua

Figura 5.4. Mapa de ocurrencia del sustrato suprayacente del acuífero Texcoco

- Profundidad del nivel del agua subterránea (D)

Para determinar la profundidad del nivel del agua subterránea, se realizó la selección y depuración de pozos localizados en el área de estudio, y pertenecientes a la red piezométrica del Valle de México (OCAVM) del año 2018. La configuración de la profundidad al nivel estático se obtuvo a partir de 34 pozos que contaron con información (Figura 5.5).

Se aprecia que las curvas varían entre las profundidades de 70 y 100 m, localizándose las de menor valor en la porción poniente, y a medida que se dirige hacia el oriente, hacia las sierras de Río Frío y Nevada, se incrementan los valores. El promedio de la profundidad en el área es de alrededor de 80 m (Figura 5.5).

Una vez clasificadas las profundidades del nivel de acuerdo con el método GOD, se obtuvo el mapa de correspondiente a este parámetro D (Figura 5.6). Se determinó un valor de 0.6 para este parámetro ya que todas las profundidades del nivel del agua subterránea fueron mayores a 50 m. Es importante señalar que, dadas las condiciones actuales del comportamiento hidráulico del acuífero, por las cuales funciona como libre, se usó el nivel real de los pozos.

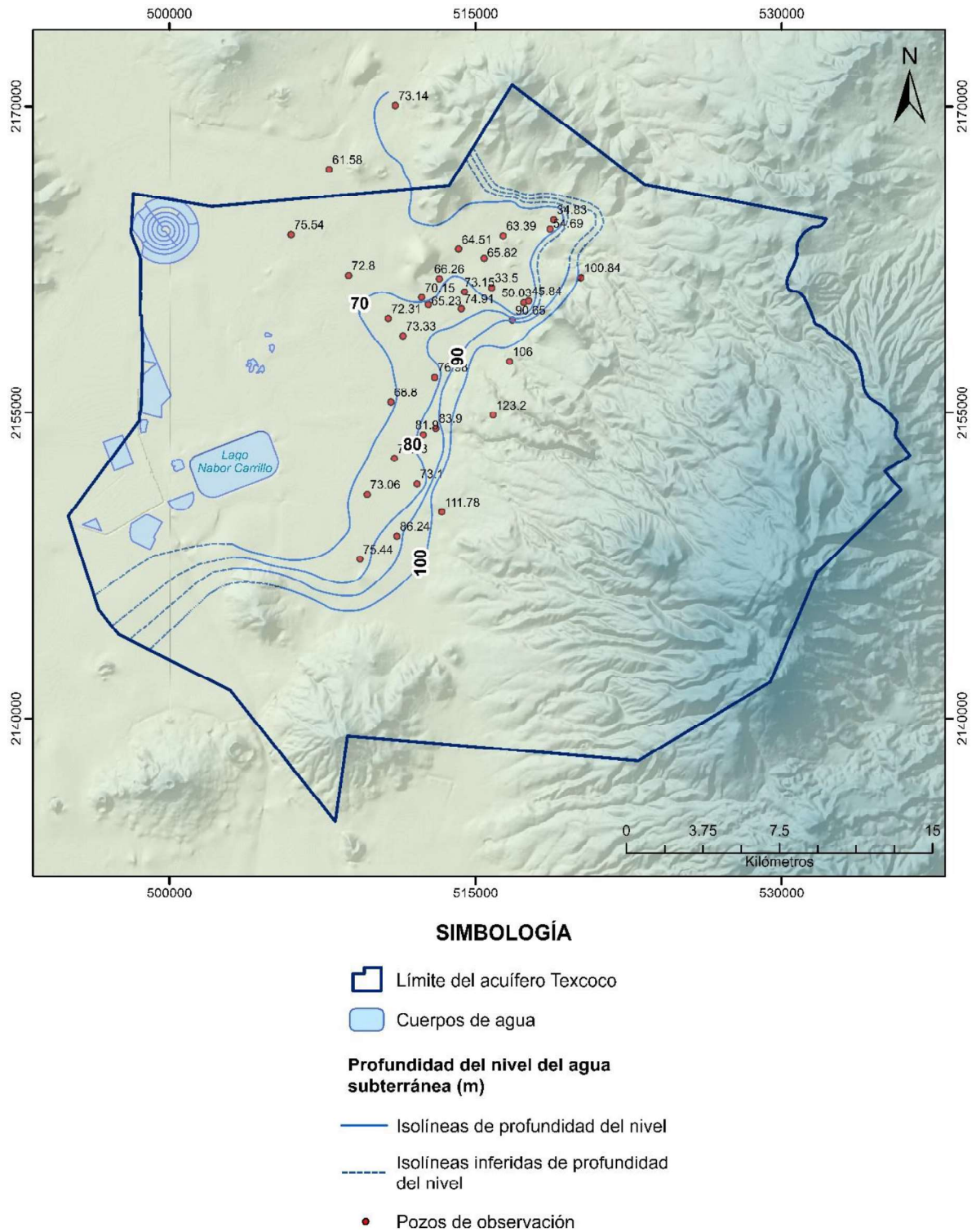
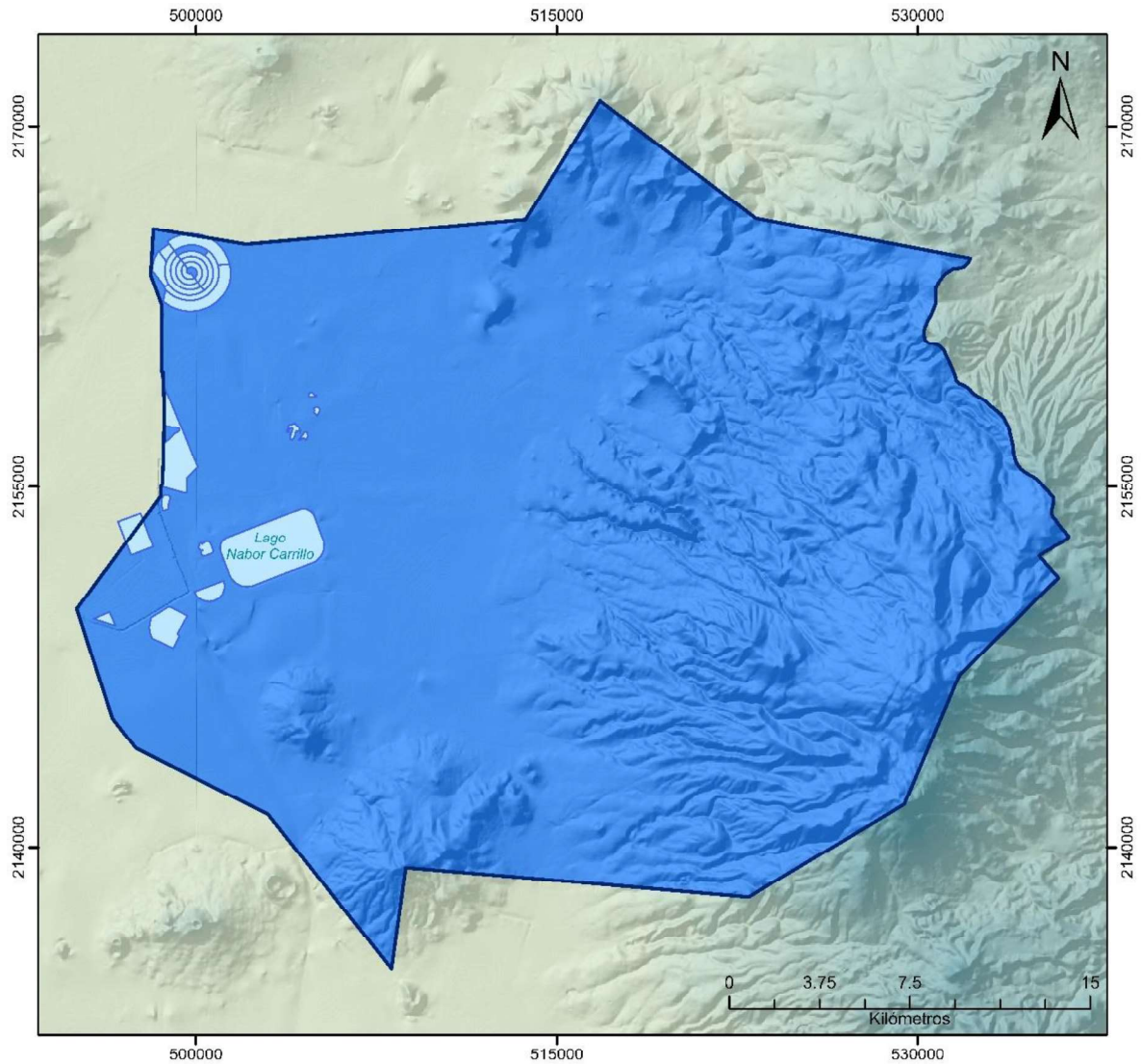




Figura 5.5. Mapa de profundidad del nivel del agua subterránea del año 2018. Acuífero Texcoco (Elaboración propia con base en datos de OCAVM, 2018)



**SIMBOLOGÍA**

 Límite del acuífero Texcoco

 Cuerpos de agua

**Profundidad (m)**      **Puntaje GOD**

 > 50                      0.6

Figura 5.6. Mapa de profundidad del nivel del agua subterránea del acuífero Texcoco de acuerdo con el método GOD

El mapa de vulnerabilidad obtenido se muestra en la Figura 5.7. Los valores del índice de vulnerabilidad GOD para el acuífero oscilaron entre 0 y 0.5, resultando dos categorías diferentes: vulnerabilidad baja y moderada. La vulnerabilidad baja se manifiesta en toda la porción oeste y una pequeña zona al norte, ocupa el 32.38 % del área del acuífero, donde se localiza la planicie del Ex-Lago de Texcoco, y se hace presente la influencia ejercida por el acuitardo arcilloso que actúa como capa semiconfinante con muy baja conductividad hidráulica.

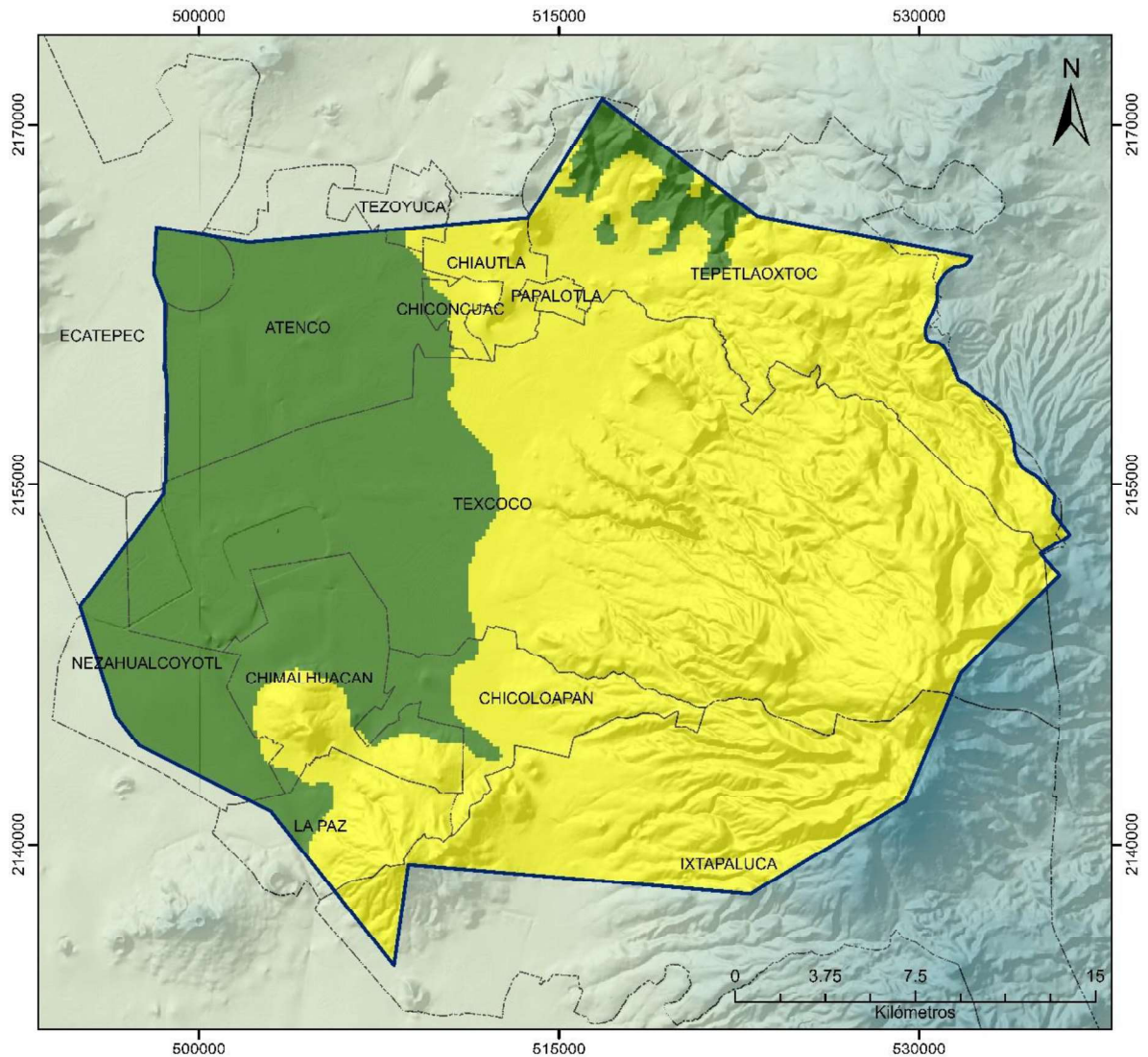
La vulnerabilidad moderada fue la que tuvo mayor cobertura en el acuífero; se distribuyó principalmente en la zona este, centro y una pequeña zona al suroeste, ocupa el 67.62 % del área del acuífero; e incluye gran parte de los municipios Texcoco, Chicoloapan, Tepetlaoxtoc, La Paz, Chimalhuacán, Chiconcuac, y los municipios de Chiautla y Papalotla. Esta vulnerabilidad se debe principalmente a la presencia de material granular, y a las rocas volcánicas fracturadas que forman parte de la Sierra Río Frío y Santa Catarina que funcionan como acuíferos en rocas fracturadas.

En la Tabla 5.2 se muestra el área que ocupa cada grado de vulnerabilidad; el 67.62 % de la superficie del acuífero presenta una vulnerabilidad moderada, y el 32.38 % de la superficie del acuífero presenta una vulnerabilidad baja.

**Tabla 5.2.** Área de cada grado de vulnerabilidad y porcentaje que ocupa respecto al área total

Grado de vulnerabilidad	Área (km <sup>2</sup> )	%
Baja	302.43	32.38
Moderada	631.63	67.62
Área total del acuífero	934	100





**SIMBOLOGÍA**

-----	Límite municipal
	Límite del acuífero Texcoco
<b>Grado de vulnerabilidad GOD</b>	<b>Índice de vulnerabilidad</b>
 Baja	0 - 0.3
 Moderada	0.3 - 0.5

Figura 5.7. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación (GOD) del acuífero Texcoco

### 1.2. Focos potenciales de contaminación

El acelerado proceso de urbanización que presenta el área del acuífero ha derivado en la proliferación de diversas fuentes de contaminación que ponen en peligro la calidad del agua subterránea. Los resultados de cuántos y cuáles focos existen en el área de estudio y su efecto potencial nocivo, se describen a continuación.

#### 1.2.1. Localización de focos potenciales de contaminación

Se identificaron focos de contaminación de tipo puntual, lineal y difuso. Entre los focos de origen puntual se encuentran los residuos sólidos, gasolineras, cementerios, industrias, minas y cuerpos de agua; localizados principalmente en las periferias urbanas, así como en la porción central del acuífero. Los focos de origen difuso se concentran en la zona suroeste, noroeste y centro del acuífero y corresponden a la agricultura de riego y a los asentamientos urbanos. Los focos de tipo lineal son ríos, canales y drenes por donde fluye agua residual; se localizan hacia el oeste, noroeste, y en la porción central del acuífero (Figura 5.8).

- *Focos de contaminación de carácter puntual*

#### Residuos sólidos

Se localizaron un total de 17 sitios de disposición de residuos sólidos, los cuales, en su mayoría, no cumplen con las normas establecidas para su correcto funcionamiento y en los cuales se depositan grandes cantidades de residuos provenientes de diversos orígenes. Estos sitios, se encuentran distribuidos principalmente en las periferias urbanas al suroeste y porción norte del acuífero.

#### Plantas de tratamiento de aguas residuales

Dentro del área del acuífero se localizaron 7 plantas de tratamiento de agua residual, las cuales reciben los efluentes líquidos provenientes del uso doméstico, comercial e industrial. Cabe mencionar que las plantas de tratamiento no siempre reciben un mantenimiento sistemático, situación que ocasiona el inadecuado funcionamiento de estas. Esto podría ocasionar que las aguas residuales no reciban un correcto tratamiento, además de causar

infiltraciones de agua con mala calidad hacia el subsuelo y con ello la posibilidad de contaminación de los cuerpos de agua subterráneos.

### Actividad industrial

La actividad industrial desarrollada en el área de estudio es reducida, principalmente se localizan fábricas de alimentos y bebidas, fábricas de procesamiento de materiales metálicos y no metálicos, fábricas de papel, textiles y artículos eléctricos. Estas actividades son capaces de generar cargas contaminantes de consideración al subsuelo como resultado del volumen, tipo de productos químicos y residuos que manipulan. La mayoría de estas fábricas, se encuentran localizados en la zona conurbana.

### Gasolineras y cementerios

En general, se localizaron un total de 75 gasolineras distribuidas principalmente en la zona urbana, en la porción suroeste del acuífero. También, se localizaron 22 cementerios ubicados principalmente al noreste del acuífero, y en algunas zonas de la porción central y al suroeste.

### Minería

Se identificaron un total de 59 sitios destinados a la actividad minera, en los cuales se extrae material para construcción como arena, grava, tezontle y tepetate, y la mayoría de ellos se identifican en la porción sureste y centro del área de estudio.

### Cuerpos de agua

Dentro del área del acuífero Texcoco se localizaron 7 cuerpos de agua pertenecientes a la zona Federal del Ex-Lago de Texcoco cuenta con varios cuerpos de agua artificiales como el Lago Nabor Carrillo y el Lago Churubusco. Esta zona se encarga de regular las aguas pluviales y residuales del Oriente del Valle de México.

- *Focos de contaminación de carácter lineal*

Para el caso del acuífero Texcoco, se consideraron 2 fuentes de carácter lineal, las cuales corresponden a los ríos, canales y drenes de agua residual, en los cuales se vierten cantidades considerables de aguas residuales tanto de origen doméstico, urbano, industrial y comercial.

- *Focos de contaminación de carácter difuso*

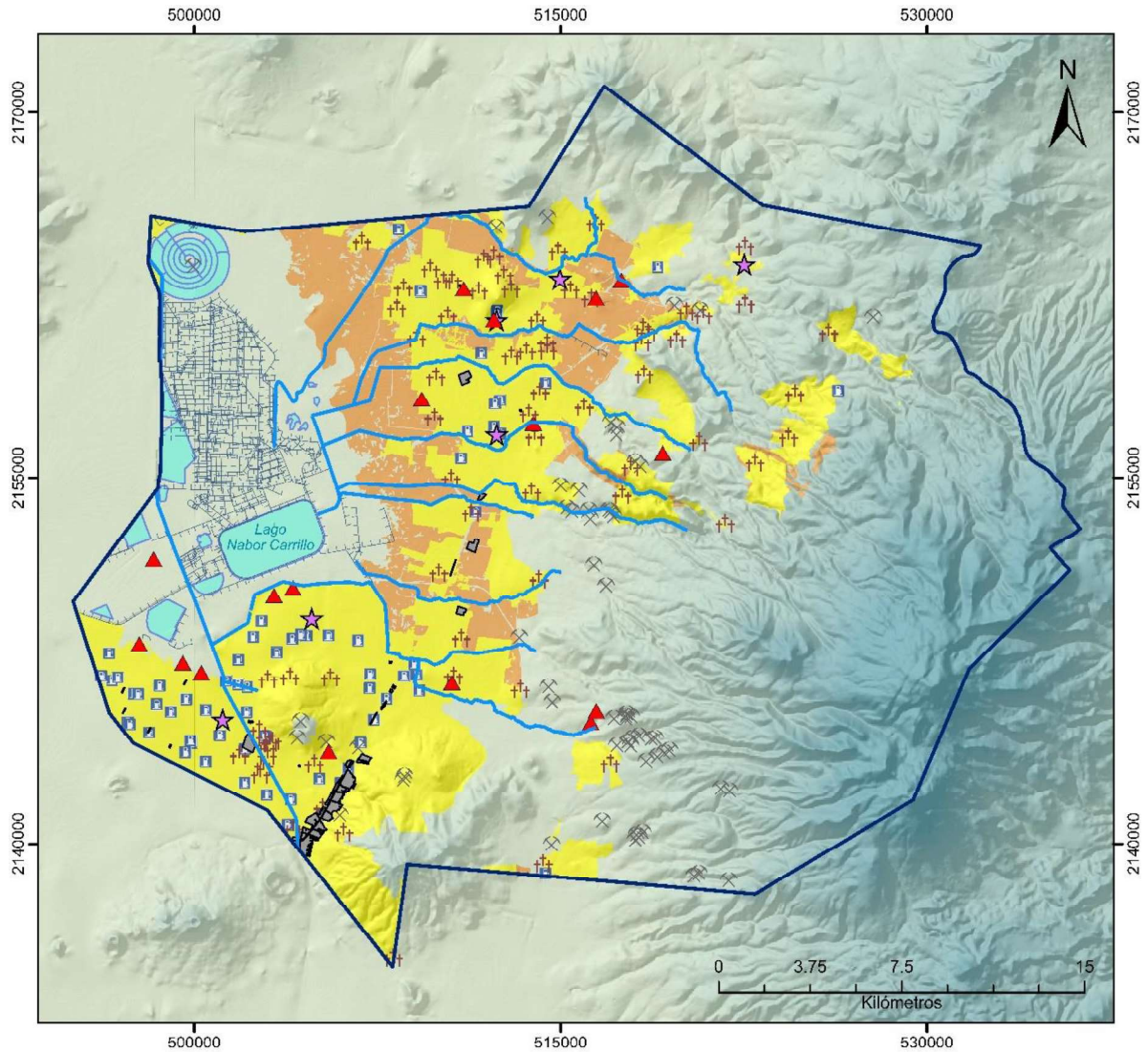
Del procesamiento de la imagen satelital LANSAT-8 se obtuvieron las zonas urbanas y la actividad agrícola (agricultura de riego).

### Agricultura de riego


La actividad agrícola de riego se desarrolla principalmente en la porción noroeste en planicie del acuífero, y en menor extensión hacia el noreste y centro. Estas zonas constituyen una amenaza latente para la calidad del agua subterránea ya que implica la aplicación de agroquímicos (fertilizantes y plaguicidas), y los elevados volúmenes de agua para riego propician la generación de lixiviados, los cuales pueden alcanzar el acuífero y afectar su calidad.

### Zona Urbana

La zona urbana dentro del área del acuífero se localiza principalmente en los municipios de Nezahualcóyotl, Chimalhuacán, Chicoloapan, La Paz y Texcoco de Mora. Estos municipios presentan una importante densidad de población, creando una demanda de agua significativa y, por lo tanto, una elevada generación de aguas residuales que amenazan la calidad del agua subterránea, ya que la principal fuente de contaminación de las zonas urbanas está asociada a las fugas de aguas residuales originadas por el mal mantenimiento o antigüedad de las tuberías de los sistemas de alcantarillado.



**SIMBOLOGÍA**

 Límite del acuífero Texcoco

**Focos potenciales de contaminación**












- |   |   |
|---|---|
|  Cementerios                             |  Canales y drenes de agua residual |
|  Gasolineras                             |  Industrias                        |
|  Minas                                   |  Agricultura de riego              |
|  Residuos sólidos                        |  Zona urbana                       |
|  Plantas de tratamiento de agua residual |  Cuerpos de agua                   |
|  Ríos                                    |   |

Figura 5.8. Localización de focos potenciales de contaminación en el acuífero Texcoco

### 1.2.2. Clasificación de focos potenciales de contaminación

Una vez localizados los focos potenciales de contaminación, se procedió a la clasificación de cada uno de ellos mediante el método POSH, el cual permitió identificar aquellos focos de contaminación que, por sus características particulares, representan un mayor efecto nocivo para la calidad del agua subterránea. De esta manera, los focos existentes se clasificaron en dos niveles cualitativos de nocividad: elevado y moderado.

- *Focos clasificados con carga potencial contaminante elevada*

En el área de estudio, los focos de contaminación con carga potencial contaminante elevada, corresponden a residuos sólidos, actividades industriales, agricultura de riego y cuerpos de agua (Figura 5.9, Tabla 5.3).

Los ríos, canales y drenes fueron considerados como focos potenciales de contaminación lineal y se clasificaron con base en sus características como focos de nocividad elevada. Se asumió que la calidad del agua de los ríos disminuye conforme los ríos atraviesan zonas con focos potenciales de contaminación clasificados con carga potencial moderada y elevada (Figura 5.9, Tabla 5.3).

- *Focos clasificados con carga potencial contaminante moderada*

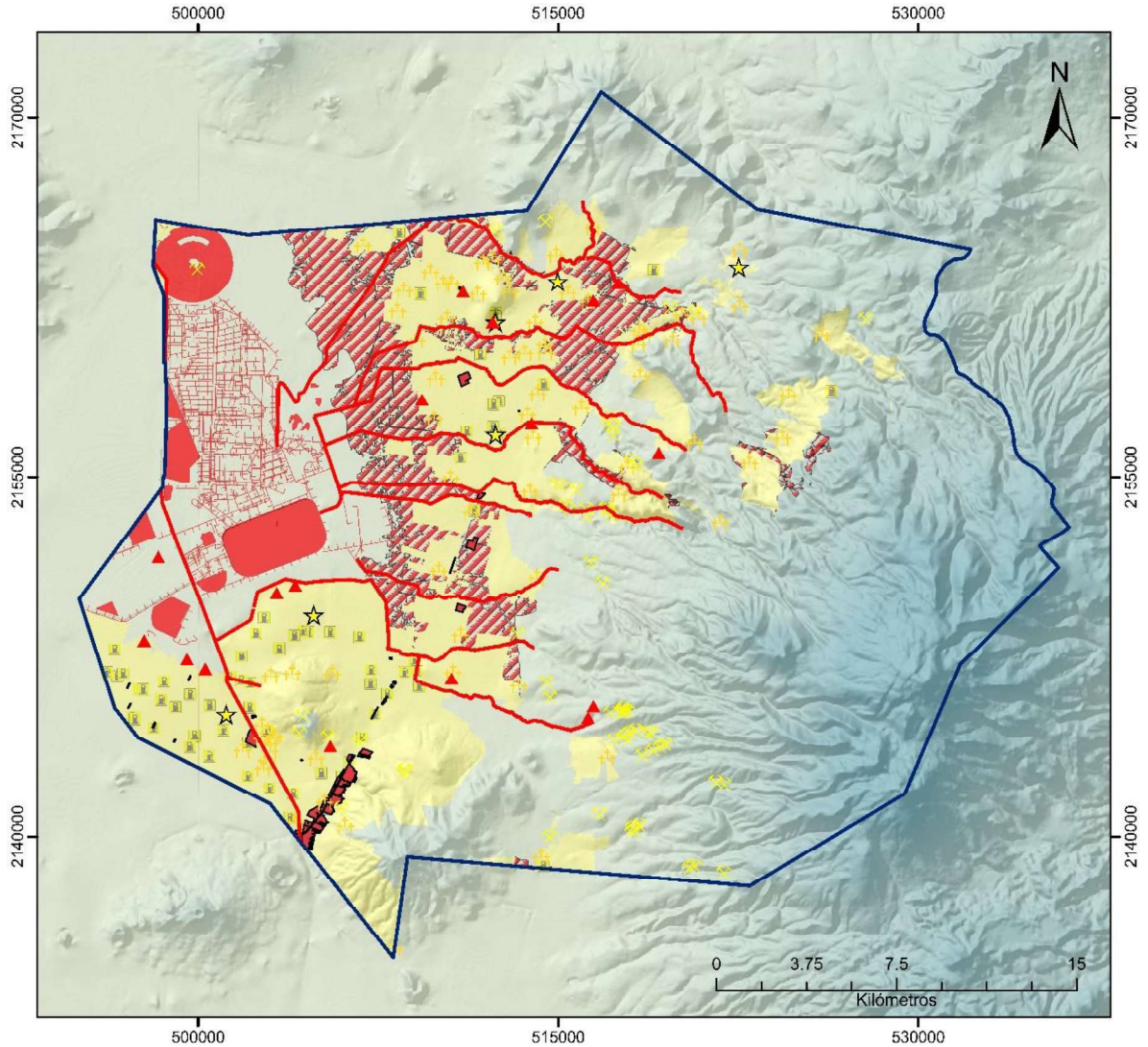
Entre los focos potenciales de contaminación con carga contaminante moderada, se encuentran: minas, gasolineras, zona urbana y plantas de tratamiento de agua residual (Figura 5.9, Tabla 5.3).

Hay que señalar que a pesar de que el método clasifica a los cementerios como una fuente con nocividad reducida, en este estudio, fueron clasificados con un nivel de nocividad moderado, debido a que el área de estudio no tiene las características que se consideran para países en desarrollo, y tampoco presenta las características establecidas por el método POSH (Figura 5.9, Tabla 5.3).

Las plantas de tratamiento fueron clasificadas con una carga potencial moderada, debido a la falta de operación de estas, además de que no siempre se tiene regulación del volumen de agua que reciben y también existe la posibilidad de contaminación al subsuelo por posibles fallas en los sistemas de tratamiento (Figura 5.9, Tabla 5.3).

**Tabla 5.3.** Clasificación de los focos potenciales de contaminación

Focos potenciales de contaminación	Clasificación
Residuos sólidos	Elevada
Agricultura de riego	Elevada
Industrias	Elevada
Canales y drenes	Elevada
Ríos	Elevada
Cuerpos de agua	Elevada
Zona urbana	Moderada
Gasolineras	Moderada
Minas	Moderada
Cementerios	Moderada
Plantas de tratamiento de aguas residuales	Moderada



**SIMBOLOGÍA**

Límite del acuífero Texcoco

**Carga potencial contaminante**

- | <b>Elevada</b>                    | <b>Moderada</b>                         |
|-----------------------------------|---|
| Residuos sólidos                  | Gasolneras                              |
| Canales y drenes de agua residual | Cementerios                             |
| Ríos                              | Minas                                   |
| Industrias                        | Plantas de tratamiento de agua residual |
| Agricultura de riego              | Zona urbana                             |
| Cuerpos de agua                   |   |

Figura 5.9. Clasificación de focos potenciales de contaminación en el acuífero Texcoco



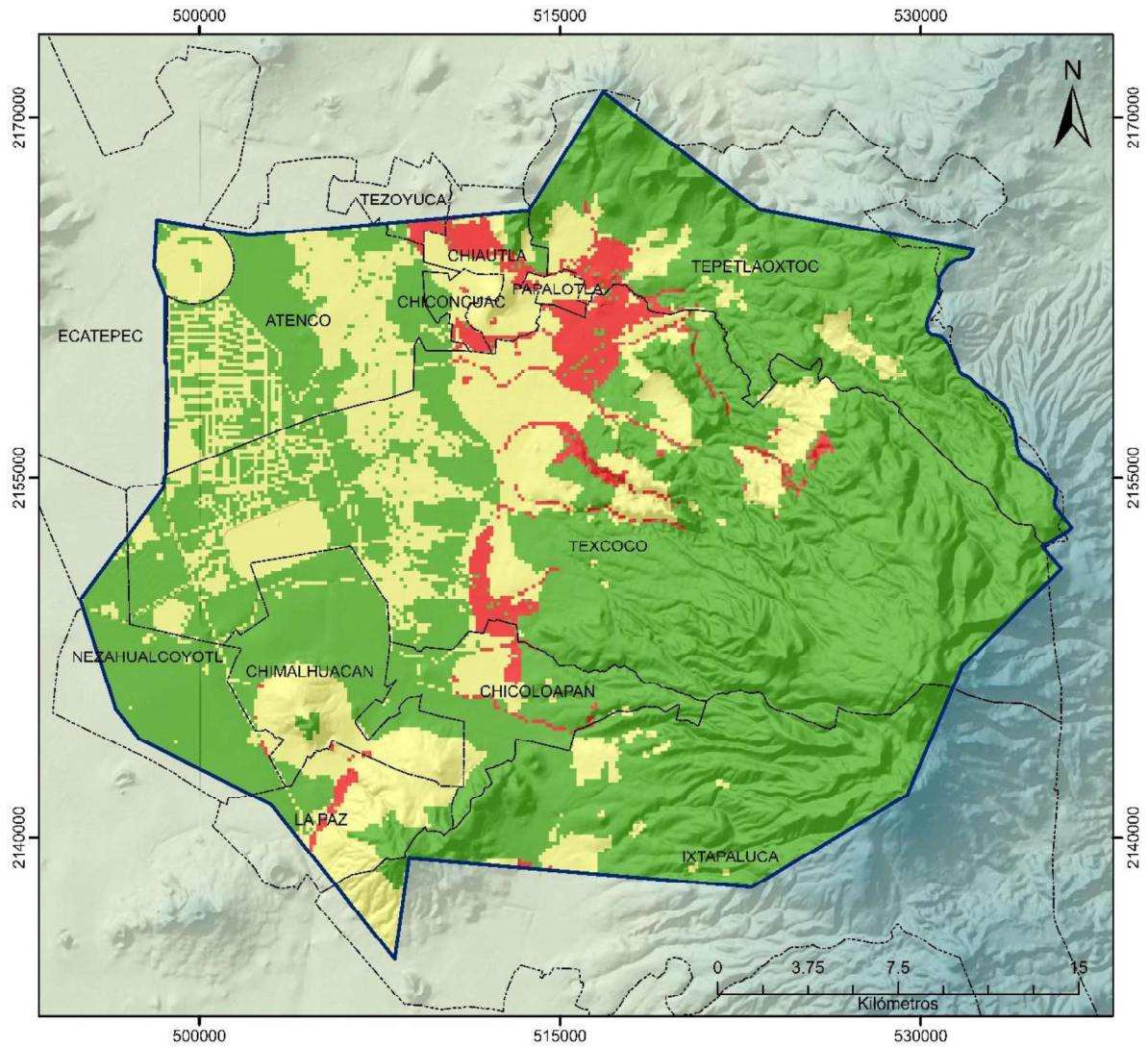
### 1.3. Cartografía de peligro de contaminación del agua subterránea

El resultado de la combinación del índice de vulnerabilidad con la clasificación de focos potenciales de contaminación fue el mapa de peligro de contaminación. Se obtuvieron índices de peligrosidad que oscilan entre 1 y 6. Estos valores fueron clasificados dentro de tres grados de peligrosidad; bajo (índice 1 y 2), moderado (índice 3 y 4) y alto (índice 6) (Figura 5.10).

Se determinó que el 4.98 % del área de estudio (46.4 km<sup>2</sup>), presenta un **peligro de contaminación alto**. Estas zonas se encuentran distribuidas en la porción norte del acuífero y, con menor extensión, hacia el sur, donde se localizan principalmente los focos de contaminación con elevada carga contaminante como, agricultura de riego, residuos sólidos, industrias y ríos; así como la superficie de vulnerabilidad moderada.

El 25.84 % del área del acuífero (241.3 km<sup>2</sup>), presenta un **peligro de contaminación moderado**, se distribuye con mayor extensión en la porción noroeste y en menor extensión hacia el sur. Estas zonas corresponden a la agricultura de riego, residuos sólidos, cuerpos de agua, “El Caracol”, ríos, canales y drenes, con elevada carga contaminante y localizadas en áreas de vulnerabilidad baja, mientras que la zona urbana, gasolineras, cementerios, minas y plantas de tratamiento con carga contaminante moderada se ubican en el área de vulnerabilidad moderada.

El **peligro de contaminación bajo** ocupa la mayor parte del área del acuífero, 69.18 % que representa 646.2 km<sup>2</sup>, dicho peligro se encuentra distribuido principalmente en las periferias del valle, principalmente en la porción sureste. Dichas zonas corresponden a la vulnerabilidad baja y moderada, pero sin la presencia de focos potenciales de contaminación; por lo que representan zonas con menores probabilidades de contaminación de agua subterránea.



**SIMBOLOGÍA**

**Peligro de contaminación del agua subterránea**

- Alto
- Moderado
- Bajo

**Índice de peligro**

- 6
- 3 - 4
- 1 - 2

----- Límite municipal

Límite del acuífero Texcoco

Figura 5.10. Mapa de peligro de contaminación del agua subterránea del acuífero Texcoco

**Tabla 5.4.** Área de cada grado de peligrosidad y porcentaje que ocupa con respecto al área total del acuífero

Grado de Peligro	Área (km <sup>2</sup> )	%
Alto	46.45	4.98
Moderado	241.34	25.84
Bajo	646.21	69.18
Área total del acuífero	934	100

Tanto en las zonas de peligro alto, como en las de peligro moderado, existen pocas probabilidades para la atenuación de contaminantes y, por lo tanto, los contaminantes generados por las fuentes existentes pueden impactar al acuífero; lo que constituye una elevada probabilidad de afectación a los pozos de abastecimiento de agua potable. Por tal motivo, en estas zonas es necesario contar con puntos de monitoreo, que permitan determinar y evaluar los factores que afectan las características fisicoquímicas del agua subterránea en el acuífero, así como identificar los procesos fisicoquímicos que rigen la calidad del agua subterránea.

Es importante destacar que a pesar de que el mapa de vulnerabilidad indica que el acuífero, en general, es poco vulnerable a la contaminación, en la porción occidental del acuífero hay áreas donde existen procesos que pueden influir en la vulnerabilidad, como la aparición de agrietamientos, fracturas y subsidencia del terreno, dado que los materiales geológicos del Ex-Lago de Texcoco, a través del tiempo, han perdido su alto contenido de humedad debido a la extracción del agua subterránea, a la evaporación, y a la escasa recarga que reciben, además existen construcciones civiles en las cercanías del Ex-Lago de Texcoco, que han provocado que su peso actué sobre las arcillas.

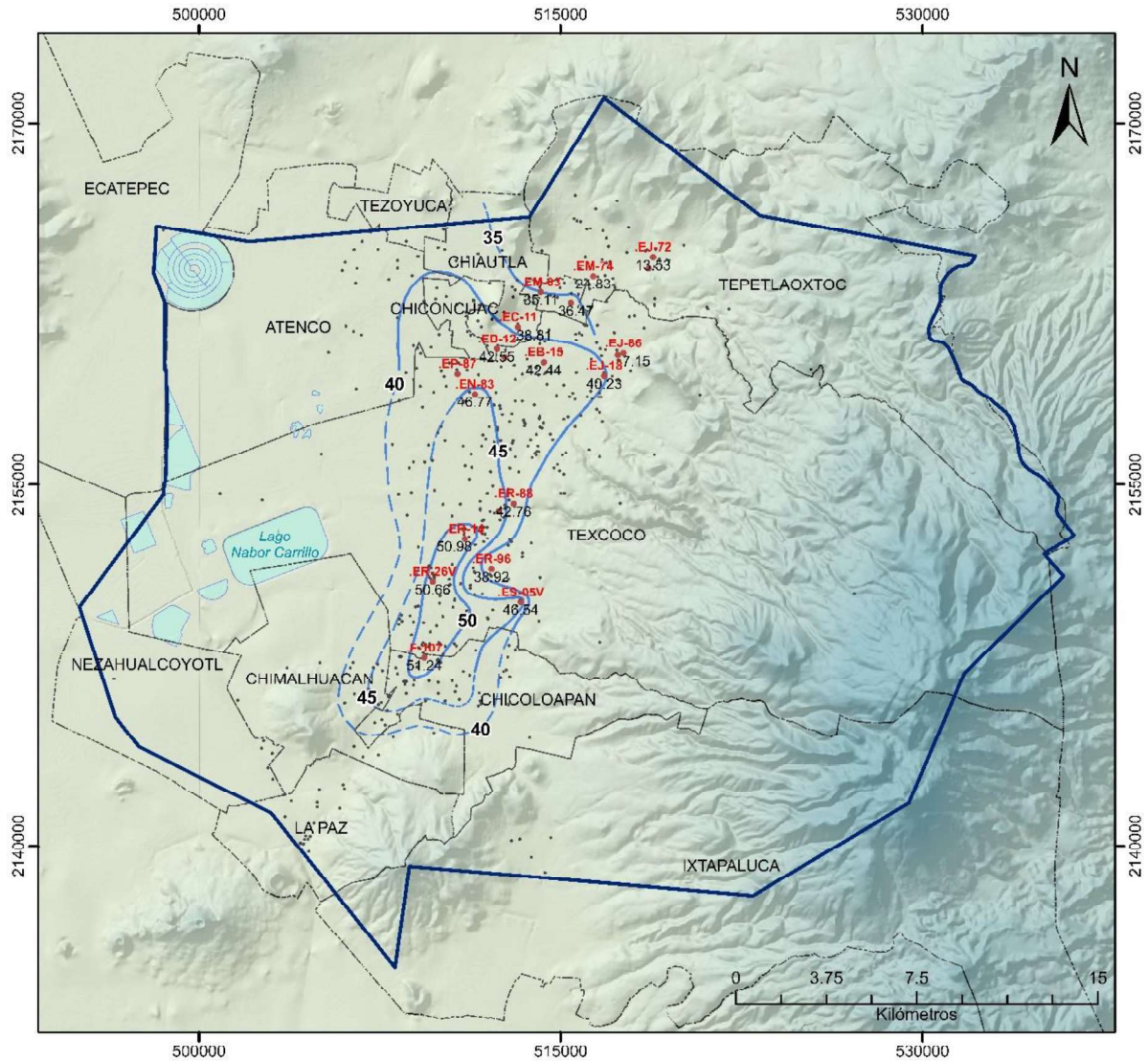
Estos procesos han generado conductos perfectos; y si suceden en zonas en las que las fuentes contaminantes se encuentran próximas, la contaminación podría llegar de manera rápida y sin obstáculos al acuífero. Este fenómeno favorece el aumento del peligro de contaminación del agua subterránea, tanto por las actividades humanas como por el medio geológico del subsuelo de la zona del Ex-Lago de Texcoco, donde se tiene agua de mala calidad contenida en el acuitardo, que podría llegar al acuífero que actualmente se está explotando.

### 2. Abatimiento del nivel del agua subterránea

Para conocer de manera general la evolución que ha tenido la piezometría del acuífero, se analizó el periodo 1980-2018. Para ello se seleccionaron los pozos de observación que tuvieran información de la profundidad del nivel piezométrico para cada año seleccionado, resultando 21 pozos con información.

De manera general, los valores de abatimiento en el acuífero oscilan desde los 35 m hasta 50 m. Los mayores abatimientos se registran principalmente en el municipio de Texcoco y Chicoloapan (zona centro), siendo, la principal zona de extracción del acuífero con abatimientos de 50 m, mientras que en la parte noroeste del acuífero este valor va disminuyendo de manera gradual hacia Atenco y Chiconcuac con abatimientos de 45 y 40 m (Figura 5.11). Estos valores también se presentan en la parte suroeste del acuífero hacia Chimalhuacán y Chicoloapan.

En la zona sur del municipio de Texcoco, el mayor abatimiento del agua subterránea que se generó fue el registrado en el piezómetro F-107 con 51.24 m de abatimiento, siendo una de las zonas más explotadas con una alta densidad de pozos.



**SIMBOLOGÍA**

- Isolíneas de abatimiento (m) periodo 1980 - 2018**
- Isolíneas de abatimiento
- - - Isolíneas de abatimiento inferidas
- Pozos de extracción
- Límite municipal
- ▭ Limite del acuífero Texcoco
- Cuerpos de agua
- EJ-72 Pozos de observación
- Arriba: ID del pozo
- Abajo: Abatimiento (m)

Figura 5.11. Mapa de isólinas de abatimiento para periodo 1980-2018. Acuífero Texcoco

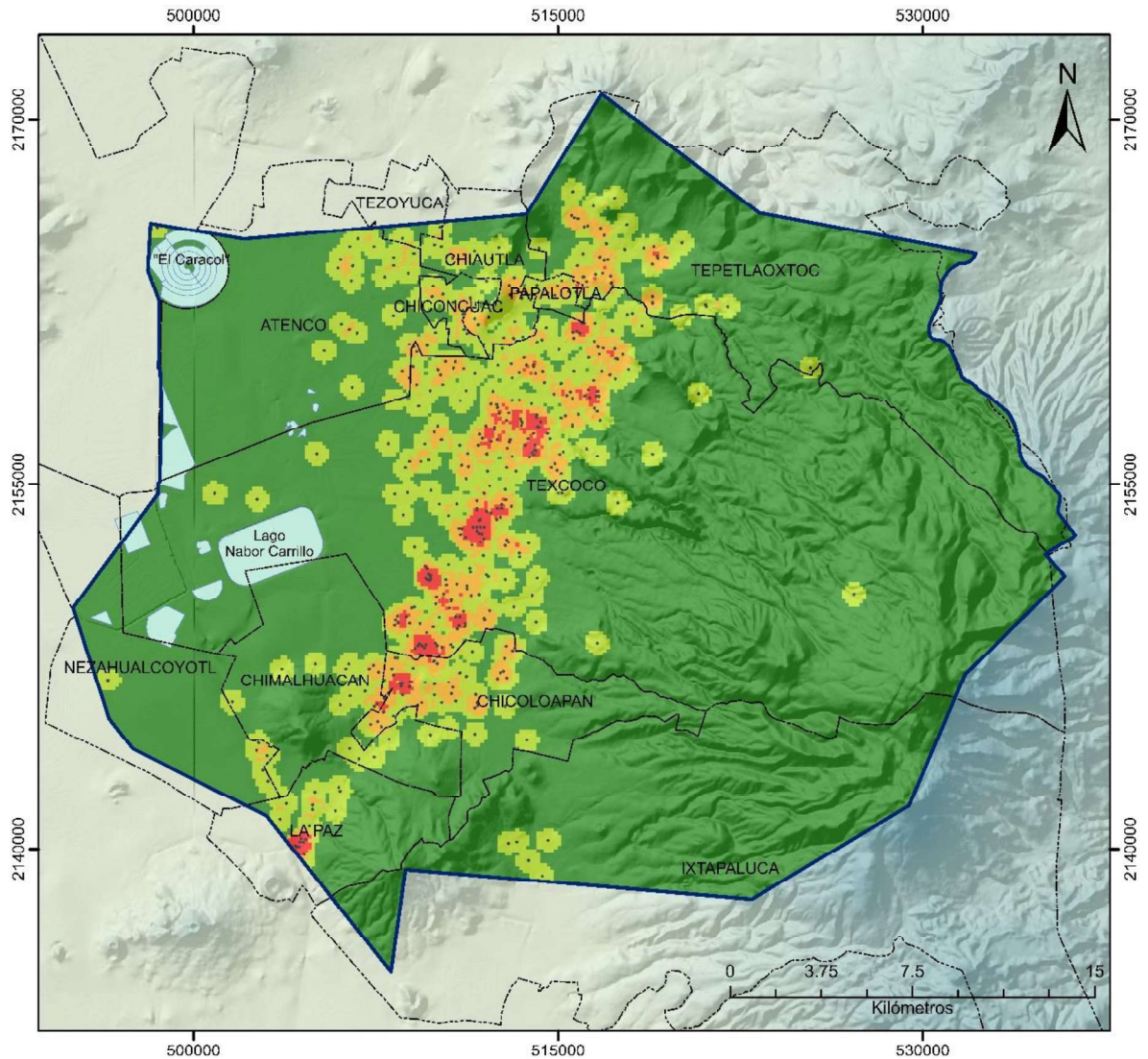
### 3. Densidad de pozos de extracción

La densidad de pozos es definida como el número de pozos por unidad de superficie (número de pozos por km<sup>2</sup>). Para calcular la densidad de pozos en el acuífero, se utilizó la base de datos del REPDA, y se ubicaron espacialmente a todos los pozos de extracción documentados.

Con la finalidad de visualizar y localizar las zonas con mayor densidad de pozos en el área de estudio se hizo una clasificación en cuatro clases, con valores que varían de 0 a 10 pozos/km<sup>2</sup> (Figura 5.12). Las áreas con mayor densidad de pozos (7 a 10 pozos km<sup>2</sup>) destacan en el centro del área de estudio (municipio de Texcoco) en donde se tiene un mayor número de pozos de extracción, así como también hacia el sur en Chicoloapan y La Paz.

### 4. Subsistencia

El mapa de subsidencia fue tomado del estudio de Auvinet et al. (2017) y se clasificó en cuatro rangos más representativos (Figura 5.13). Aquellas zonas con un mayor grado de subsidencia (27-43 cm/año) tienen una mayor importancia, ya que presentan la probabilidad de sufrir agrietamientos significativos en superficie y, por lo tanto, generar daños estructurales y aumentar la vulnerabilidad del acuífero ante la contaminación, mientras que las zonas con menor grado de subsidencia (0-7 cm/año) tiene una menor importancia respecto con los demás valores.



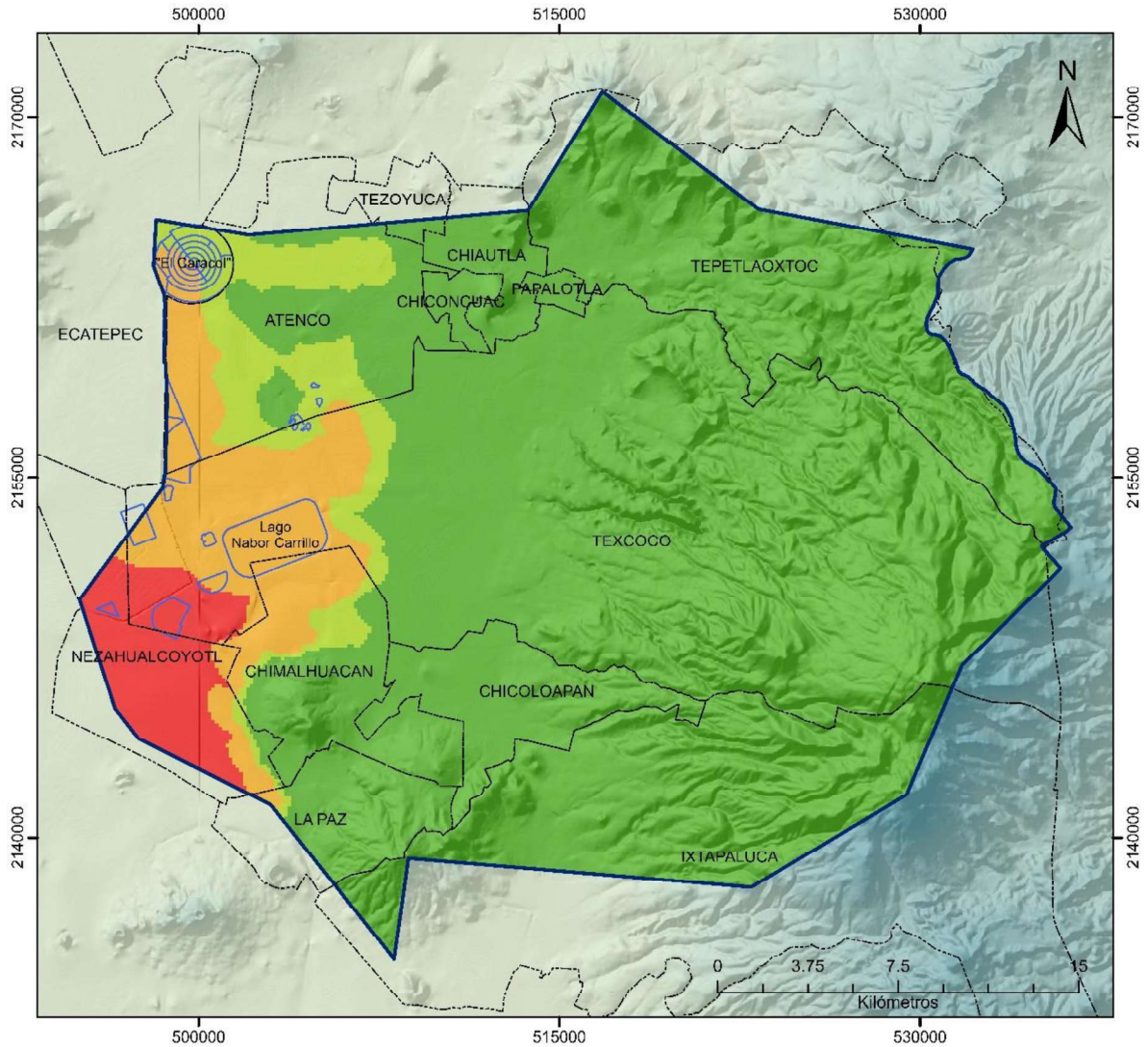
**SIMBOLOGÍA**

**Densidad de pozos  
(# de pozos/km<sup>2</sup>)**

- 0 - 1.19
- 1.19 - 3.81
- 3.81 - 7.63
- 7.63 - 10.09

- Pozos de extracción
- Límite municipal
- Límite del acuífero Texcoco
- Cuerpos de agua

Figura 5.12. Mapa de densidad de pozos de extracción por superficie de 1 km<sup>2</sup> en el acuífero Texcoco (Elaboración propia con información del REPGA)



**SIMBOLOGÍA**

**Subsidencia (periodo 1999–2008)**

Rangos (cm/año)

- 0 - 7
- 7 - 18
- 18 - 27
- 27 - 43

----- Límite municipal

Límite del acuífero Texcoco

Cuerpos de agua

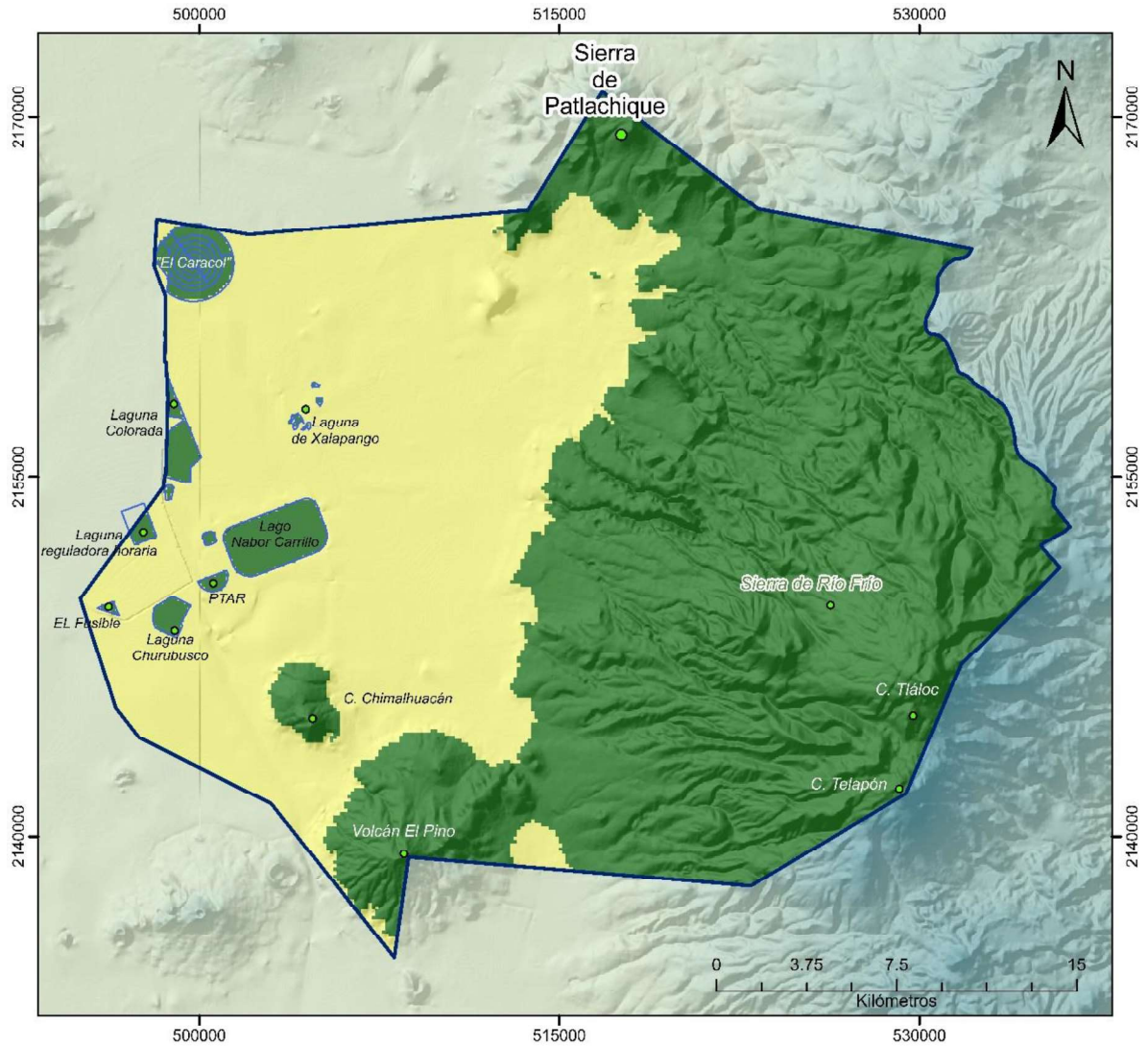
Figura 5.13. Mapa de rangos de velocidad de hundimiento en cm/año, periodo 1999-2008. Acuífero Texcoco



### 5. Restricciones que se aplicaron en análisis multicriterio

El mapa de restricciones está definido por los cuerpos de agua y las zonas montañosas que integran el acuífero, debido a la inaccesibilidad que representa monitorear los niveles y la calidad del agua subterránea en estas zonas (Figura 5.14). También se consideran como restricciones debido a que el monitoreo efectivo de los recursos hídricos depende de los recursos financieros disponibles, y la implementación de un programa de monitoreo en estos lugares representa costos elevados (Sánchez Hernández, 2013).

Los cuerpos de agua más relevantes son: Lago Nabor Carrillo, Recreativo PTAR, Laguna reguladora horaria, Laguna de Xalapango, Laguna Norte, Laguna Churubusco, Laguna Colorada, EL Fusible, y el Evaporador solar “El caracol”. Las zonas montañosas comprenden la Sierra de Río Frío, Sierra Patlachique, Volcán El Pino y Cerro Chimalhuacán.



**SIMBOLOGÍA**





-  Límite del acuífero Texcoco
-  Cuerpos de agua
- Restricciones**
-  0 (áreas excluidas)
-  1 (área óptima)

Figura 5.14. Restricciones (cuerpos de agua y zonas montañosas) desde la perspectiva booleana donde 0 es el área excluida y 1 es el área óptima.

### 5.2.2. Ponderación de criterios mediante el método AHP

Se utilizó AHP para determinar los pesos de los criterios. La asignación de pesos está en función de la importancia de cada criterio o influencia que tiene sobre el objetivo de la investigación, las calificaciones de comparación están en la escala de 1 a 9 de Saaty (Saaty, 1990). En la Tabla 5.5, se muestra el puntaje asignado a cada criterio.

Los pesos normalizados para cada criterio fueron calculados manualmente, y la matriz resultante se muestra en la Tabla 5.6, resultando así el siguiente orden de importancia de los criterios en esta red; 1) Peligro de contaminación del agua subterránea, 2) Abatimiento del nivel del agua subterránea, 3) Densidad de pozos extracción y, 4) Subsistencia. Los valores asignados varían según el número de criterios; para este caso varían desde 1 (de mayor importancia) a 4 (menor importancia).

La suma de los promedios  $W_i$  fue de 1, lo cual indica que el proceso de ponderación es satisfactorio. El *grado de consistencia (CR)* de la matriz, se calculó también de forma manual. En la Tabla 5.7 y 5.8, se muestran los resultados obtenidos del vector sumatorio de pesos, vector de consistencia y Lambda ( $\lambda_{max}$ ).

**Tabla 5.5.** Matriz de comparación por pares de los criterios utilizados para el proceso AHP

Criterios	Peligro de contaminación del agua subterránea	Abatimiento del nivel piezométrico	Densidad de pozos de extracción	Subsistencia del terreno
Peligro de contaminación del agua subterránea	1	3	5	7
Abatimiento del nivel piezométrico	1/3	1	5	5
Densidad de pozos de extracción	1/5	1/5	1	3
Subsistencia del terreno	1/7	1/5	1/3	1
$\Sigma$	1.68	4.40	11.33	16.00

**Tabla 5.6.** Matriz de pesos normalizados para cada criterio

Criterios	Peligro de contaminación del agua subterránea	Abatimiento del nivel piezométrico	Densidad de pozos de extracción	Subsidencia del terreno	$W_i$
Peligro de contaminación del agua subterránea	0.59659	0.68182	0.44118	0.43750	0.53927
Abatimiento del nivel piezométrico	0.19886	0.22727	0.44118	0.31250	0.29495
Densidad de pozos de extracción	0.11932	0.04545	0.08824	0.18750	0.11013
Subsidencia del terreno	0.08523	0.04545	0.02941	0.06250	0.05565
$\Sigma$					1

**Tabla 5.7.** Valores resultantes del vector sumatorio de pesos

Criterios	Peligro de contaminación del agua subterránea	Abatimiento del nivel piezométrico	Densidad de pozos de extracción	Subsidencia	Vector sumatorio de pesos
Peligro de contaminación del agua subterránea	0.53927	0.88486	0.55064	0.38954	2.36430
Abatimiento del nivel piezométrico	0.17976	0.29495	0.55064	0.27824	1.30359
Densidad de pozos de extracción	0.10785	0.05899	0.11013	0.16695	0.44392
Subsidencia	0.07704	0.05899	0.03671	0.05565	0.22839

**Tabla 5.8.** Valores resultantes del cálculo del vector de consistencia y  $\lambda_{\max}$

Criterios	Vector sumatorio de pesos	$W_i$	Vector de consistencia
Peligro de contaminación del agua subterránea	2.36430	0.53927	4.38426
Abatimiento del nivel piezométrico	1.30359	0.29495	4.41964
Densidad de pozos de extracción	0.44392	0.11013	4.03096
Subsidencia del terreno	0.22839	0.05565	4.10410
$\Sigma$			<b>16.93896</b>
$\lambda_{\max}$			<b>4.23474</b>

El Índice de inconsistencia aleatorio (RI) se obtuvo de la Tabla 4.8, y depende del número de elementos que son comparados. En este caso fueron utilizados 4 criterios que corresponden al RI de 0.9. La Tabla 5.9 muestra los resultados obtenidos para cada uno de los elementos descritos previamente.

**Tabla 5.9.** Valores resultantes de CI, RI y CR.

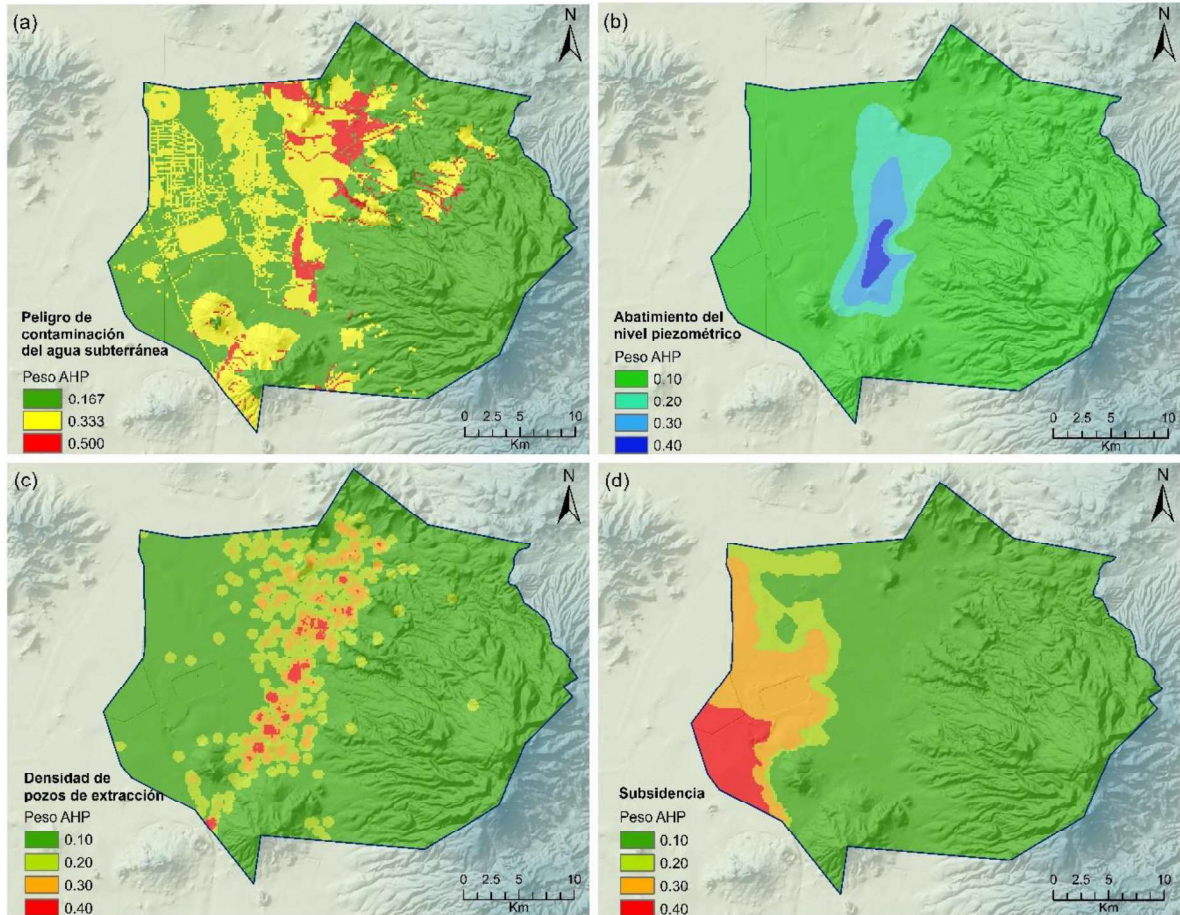
<b>Índice de consistencia (CI)</b>	0.078
<b>Índice de inconsistencia aleatorio (RI)</b>	0.9
<b>Grado de consistencia (CR)</b>	0.087

El grado de consistencia (CR) en la red de calidad fue de 0.087, lo que demuestra que el procedimiento fue aplicado exitosamente y no requiere de ajustes.

Finalmente, los rangos asignados a las diferentes características de cada criterio y sus pesos normalizados se muestran en la Tabla 5.10. Con los resultados obtenidos del AHP se generaron los mapas ponderados de los 4 criterios utilizados en este estudio. Los mapas resultantes se presentan en la Figura 5.15.

**Tabla 5.10.** Pesos asignados y normalizados de las diferentes características de los criterios para la definición de áreas prioritarias de control

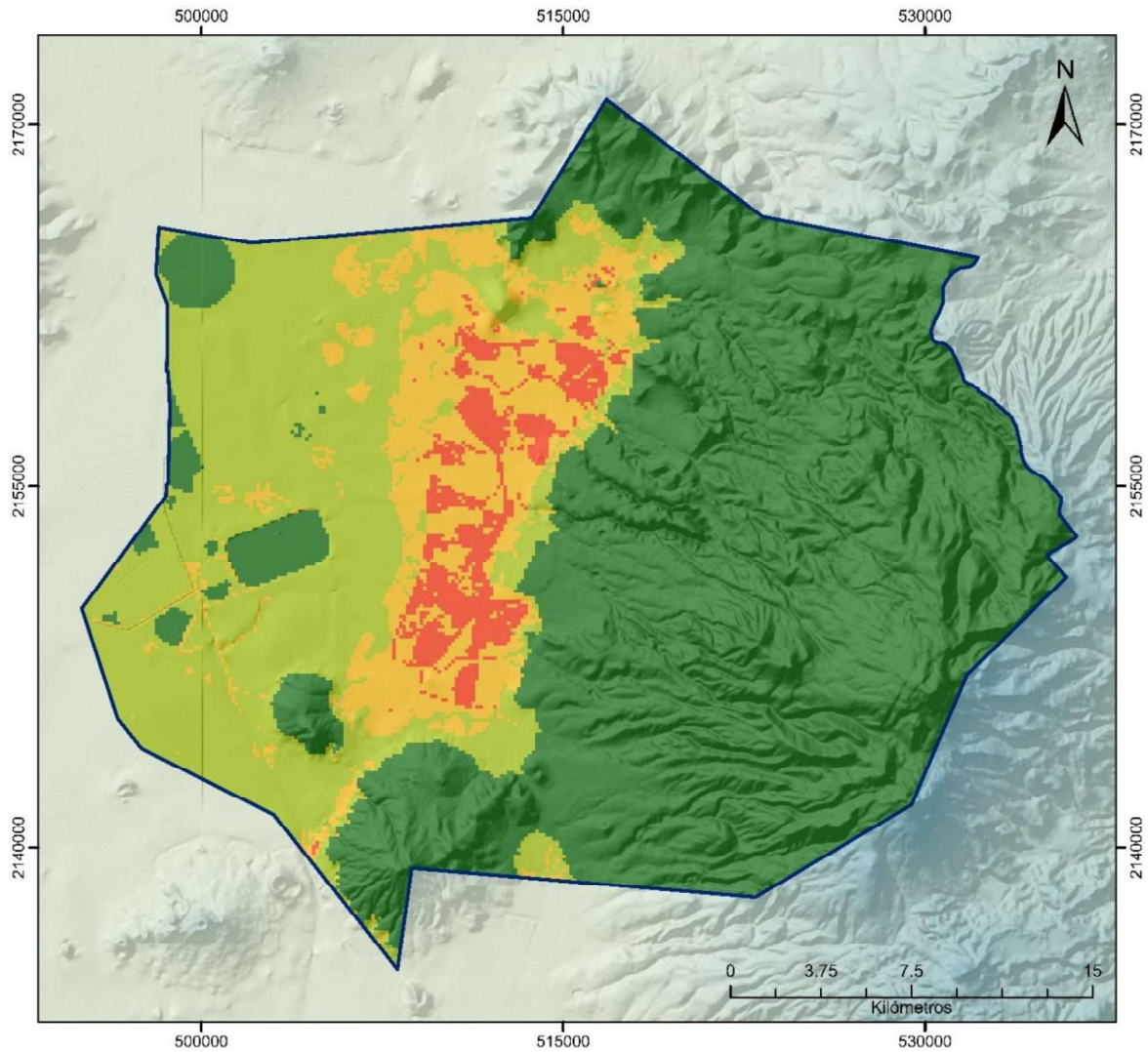
Criterios	Características/Clases Categorías	Rango asignado	Peso normalizado de criterios ( $W_f$ )	Peso de los criterios ( $W_i$ )
<b>Peligro de contaminación del agua subterránea</b>	Bajo	1	0.167	<b>0.53927</b>
	Moderado	2	0.333	
	Alto	3	0.500	
<b>Abatimiento del nivel piezométrico (m)</b>	< 40	1	0.10	<b>0.29495</b>
	40	2	0.20	
	45	3	0.30	
	> 45	4	0.40	
<b>Densidad de pozos de extracción (pozos/km<sup>2</sup>)</b>	0-1	1	0.10	<b>0.11013</b>
	1-4	2	0.20	
	4-7	3	0.30	
	7-10	4	0.40	
<b>Subsidencia (cm/año)</b>	0-7	1	0.10	<b>0.05565</b>
	7-18	2	0.20	
	18-27	3	0.30	
	27-43	4	0.40	




**Figura 5.15.** Mapas ponderados de los cuatro criterios utilizados para la definición de áreas prioritarias de control para el monitoreo de la calidad del agua subterránea. a) peligro de contaminación, b) abatimiento del nivel piezométrico, c) densidad de pozos de extracción y d) subsidencia

### 5.2.3. Agregación de criterios

La agregación de criterios se realizó de manera automatizada con el software ArcGis 10.4.1 mediante la suma ponderada. El último paso del análisis multicriterio utilizó los pesos relativos obtenidos para cada criterio y sus clases, multiplicó cada *pixel* de las imágenes de los criterios por su peso relativo, y posteriormente, se sumaron todos los criterios generando como resultado el mapa de áreas prioritarias de control para el monitoreo de la calidad del agua subterránea. El mapa resultado del análisis multicriterio presenta valores que oscilan de 0.136 a 0.426 (Figura 5.16). Las áreas que tienen el mayor valor son las que tienen prioridad de ser monitoreadas.





**SIMBOLOGÍA**


 Limite del acuífero Texcoco

**Resultado del análisis multicriterio**

**Valores**

 0.136 - 0.187

 0.136 - 0.276

 0.276 - 0.426

 Restricciones

Figura 5.16. Mapa resultado del análisis multicriterio. Acuífero Texcoco

### 5.2.4. Priorización de áreas de monitoreo

El mapa de áreas prioritarias de control permite delimitar las zonas que requieren ser monitoreadas, de acuerdo con su puntaje de prioridad. Con el objetivo de identificar mejor estas áreas se clasificó el mapa de la figura 5.16 en tres categorías que fueron Alta, Media y Baja (Figura 5.17). Las áreas de categoría alta requieren de una red de monitoreo adecuada (puntos necesarios de monitoreo), para obtener datos más precisos de los cambios en la calidad del agua subterránea.

En este sentido, la categoría “alta” coincide con las áreas de mayor abatimiento, alto peligro de contaminación del agua subterránea y alta densidad de pozos. En general, la categoría alta tiene relación con la importancia de los criterios y sus pesos relativos.

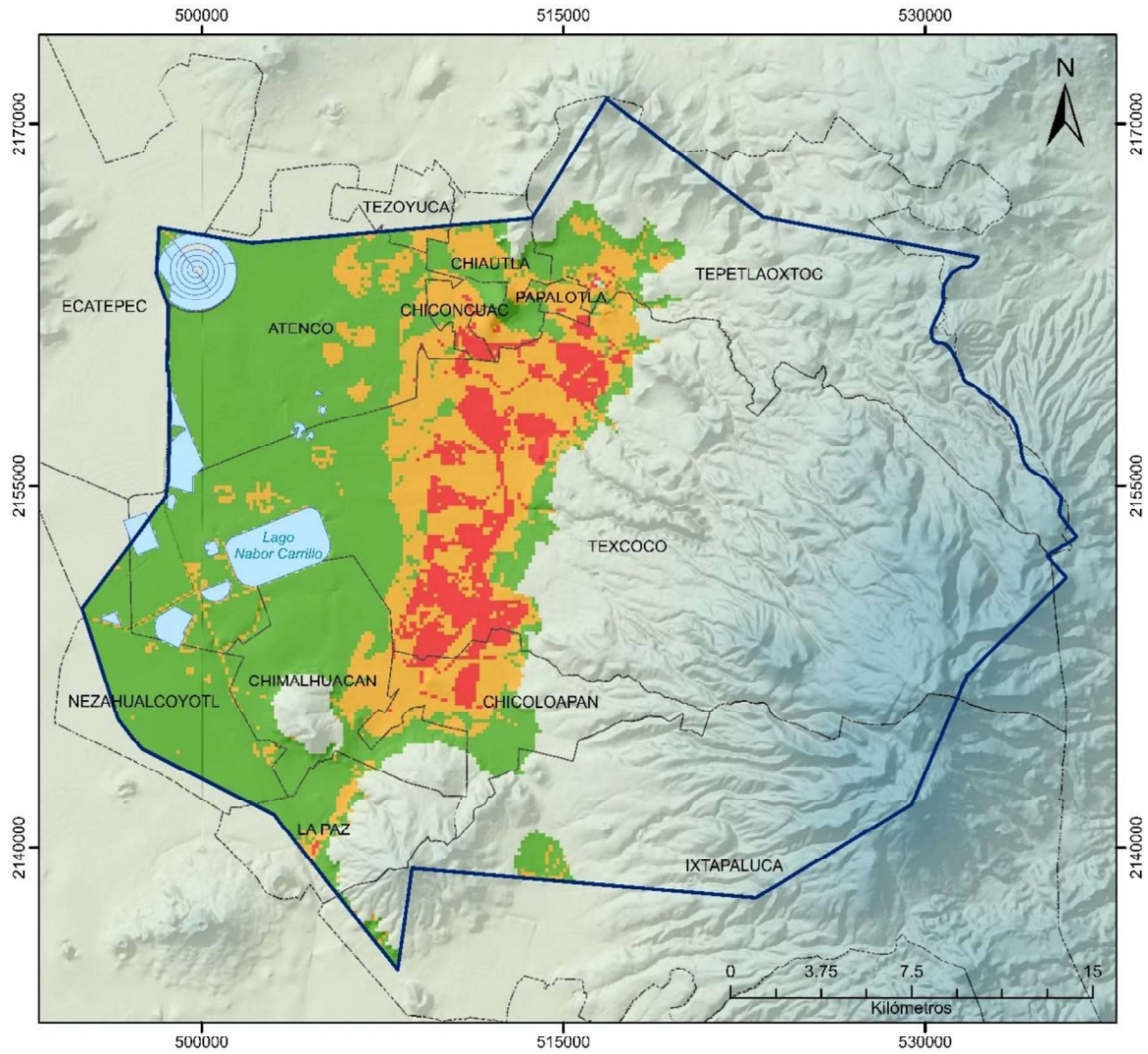
Cubre una superficie con un porcentaje del 3.8 % con respecto al área total del acuífero, especialmente estas áreas sobresalen en el municipio de Texcoco y en menor extensión se presentan en los municipios de Chicoloapan y Chiconcuac; y pequeñas zonas en los municipios de Chiautla, Papalotla, Tepetlaoxtoc y La Paz.

La categoría de prioridad “media” representa el 11.4 % de la superficie del acuífero y ocupa la mayor parte del municipio de Texcoco, principalmente, Chicoloapan y Chimalhuacán. También se observan áreas en la zona norte, noreste y en la zona del Ex-Lago de Texcoco.

La categoría de prioridad "baja" ocupa la mayor extensión de la planicie del acuífero, y cubre una superficie con un porcentaje de 26 % con respecto al total. En esta área no se requiere de puntos de monitoreo y ello se debe, principalmente, a la influencia del acuitardo semiconfinante que sobreyace al acuífero. El acuífero al encontrarse cubierto por esta capa tiene una protección ante los focos potenciales de contaminación que se localizan en estas zonas; sin embargo, al presentarse subsidencia en esta área, existe la probabilidad de suscitarse agrietamientos significativos en superficie y, por lo tanto, aumentar la vulnerabilidad del acuífero ante la contaminación. Además, el agua subterránea contenida en el acuitardo lacustre se considera de muy mala calidad y debido a los cambios en la



dinámica del acuífero, podría llegar al acuífero. Por lo anterior se recomienda contar también con puntos de monitoreo en esta área.



**SIMBOLOGÍA**

- Límite municipal
  - ▭ Límite del acuífero Texcoco
  - Cuerpos de agua
- Áreas prioritarias de control**
- Prioridad alta
  - Prioridad media
  - Prioridad baja

**Figura 5.17.** Categorías de áreas prioritarias de control para el monitoreo de la calidad del agua subterránea del acuífero Texcoco

### 5.3. Propuesta de una red de monitoreo de calidad del agua subterránea en el acuífero Texcoco

Para obtener una distribución espacial adecuada de la red de monitoreo se diseñó una malla con una cuadrícula de 5 km<sup>2</sup> (Figura 5.18). Esta área fue considerada para obtener una distribución homogénea que permita el análisis espacial de los datos.

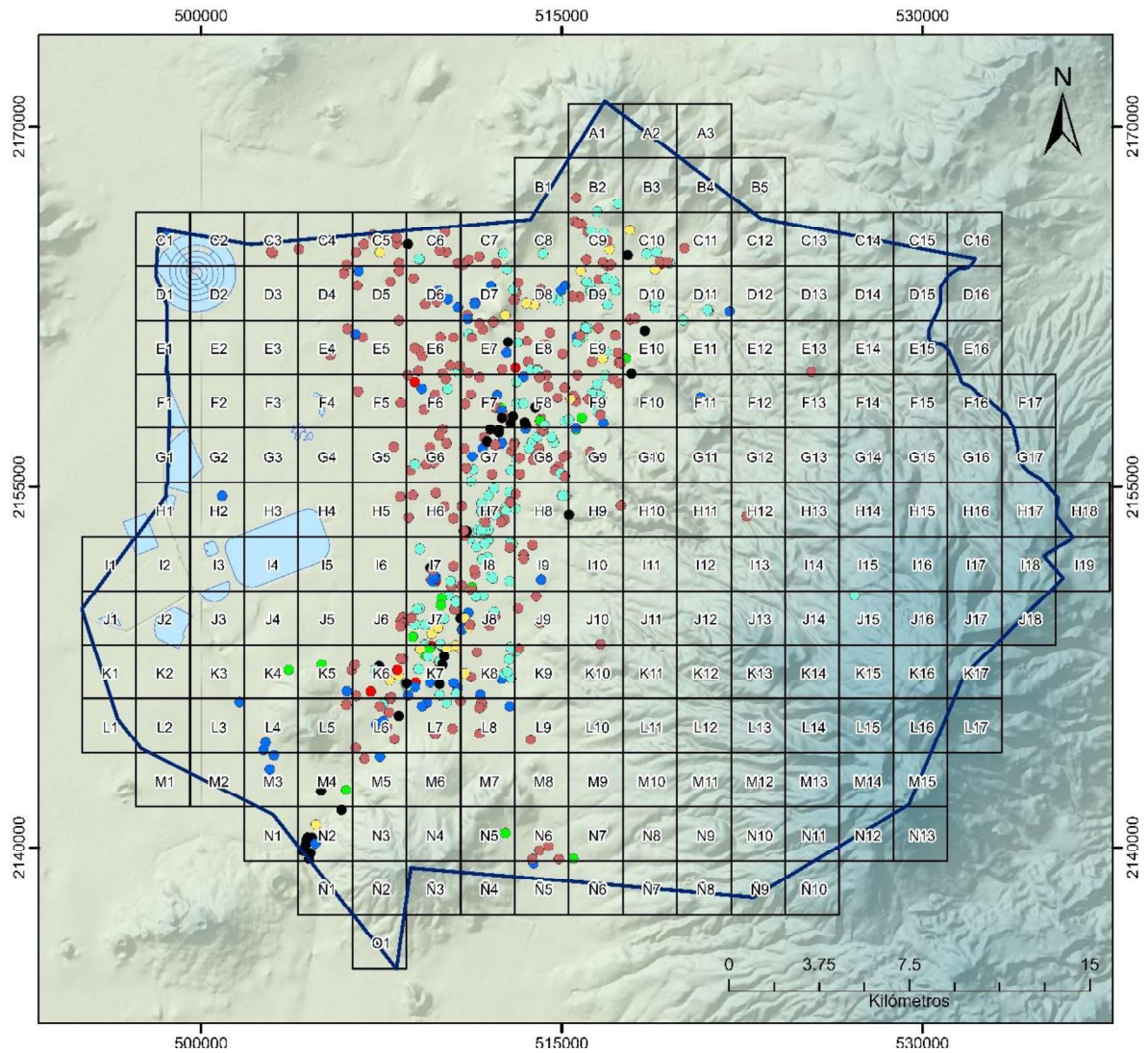
Los pozos de extracción fueron clasificados en los siguientes usos:

- Público-urbano
- Diferentes usos (doméstico, público-urbano, industrial, comercio y servicios)
- Doméstico
- Agrícola
- Industrial
- Servicios
- Pecuario

En la Figura 5.18 se muestra la malla (cuadrículas) que se diseñó para lograr la distribución espacial de los puntos de monitoreo (pozos), así como los pozos clasificados de acuerdo con su uso.

Se sobrepuso el mapa de áreas prioritarias de control con la malla y con los pozos de uso público-urbano, diferentes usos y agrícola; también la piezometría y la dirección del flujo subterráneo. En la Figura 5.19 se muestra esta sobreposición de criterios que ayudo a elegir las cuadrículas prioritarias para realizar la selección de los pozos para monitoreo (puntos de monitoreo).

Se eligieron las cuadrículas que comprenden las áreas de alta prioridad y, en algunos casos, también se eligieron cuadrículas con prioridad media para seleccionar algunos pozos aguas abajo de las zonas de alto peligro de contaminación y así monitorear la calidad de agua directamente bajo la fuente de contaminación. Dentro de estas cuadrículas se ubican los pozos potenciales para conformar la red de monitoreo. Las cuadrículas elegidas con los pozos potenciales para el monitoreo de la calidad del agua se muestran en la Figura 5.20.



**SIMBOLOGÍA**

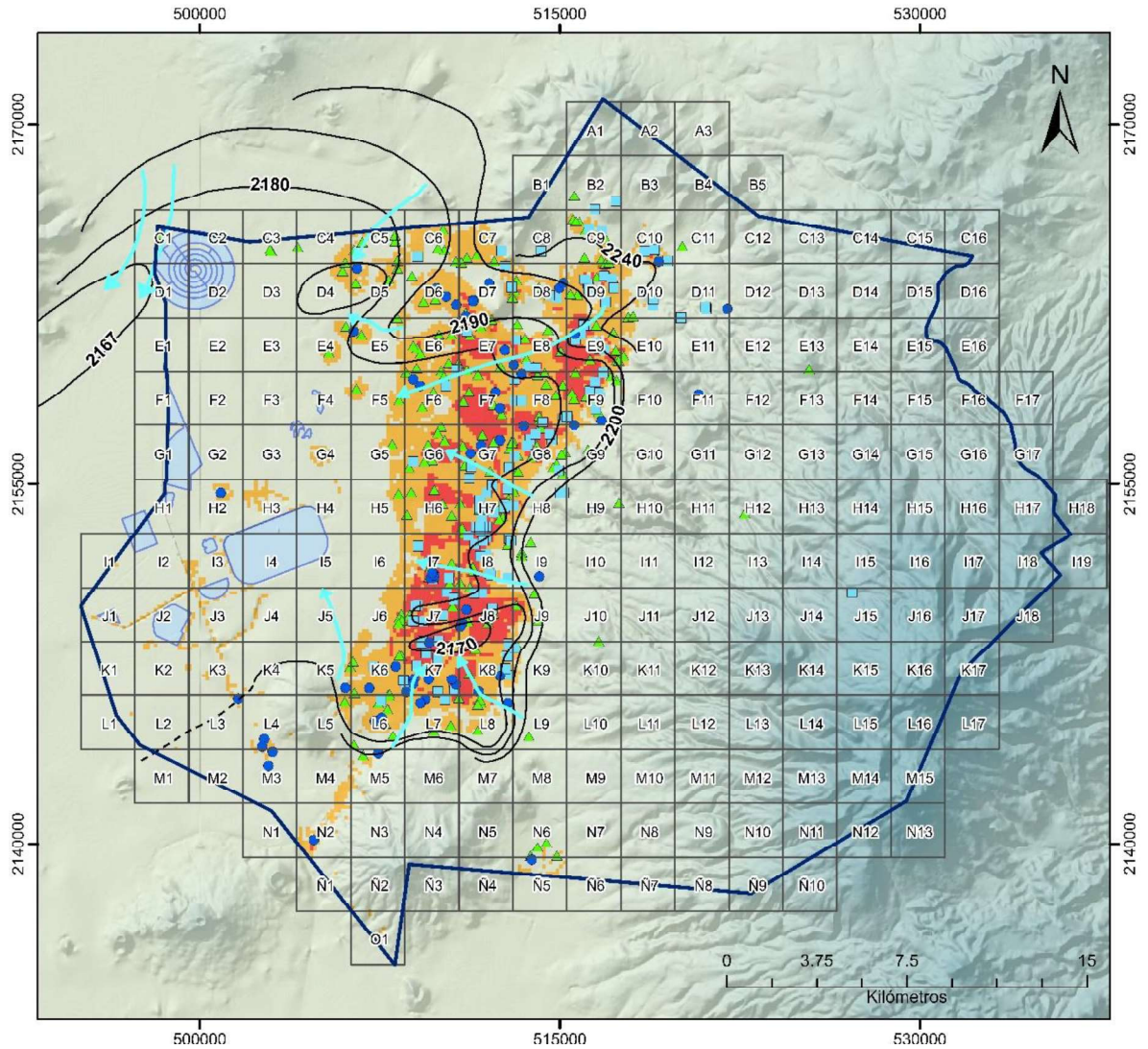
**Pozos de extracción**

**Uso**

- Diferentes usos
- Público-urbano
- Domestico
- Servicios
- Pecuario
- Agrícola
- Industrial

- Límite del acuífero Texcoco
- Cuerpos de agua
- Cuadriculas

Figura 5.18. Mapa de pozos de extracción clasificados de acuerdo con su uso e identificación de la malla. Acuífero Texcoco



**SIMBOLOGÍA**

**Áreas prioritarias de control**

- Prioridad alta
- Prioridad media

**Pozos de extracción (REPDA)**

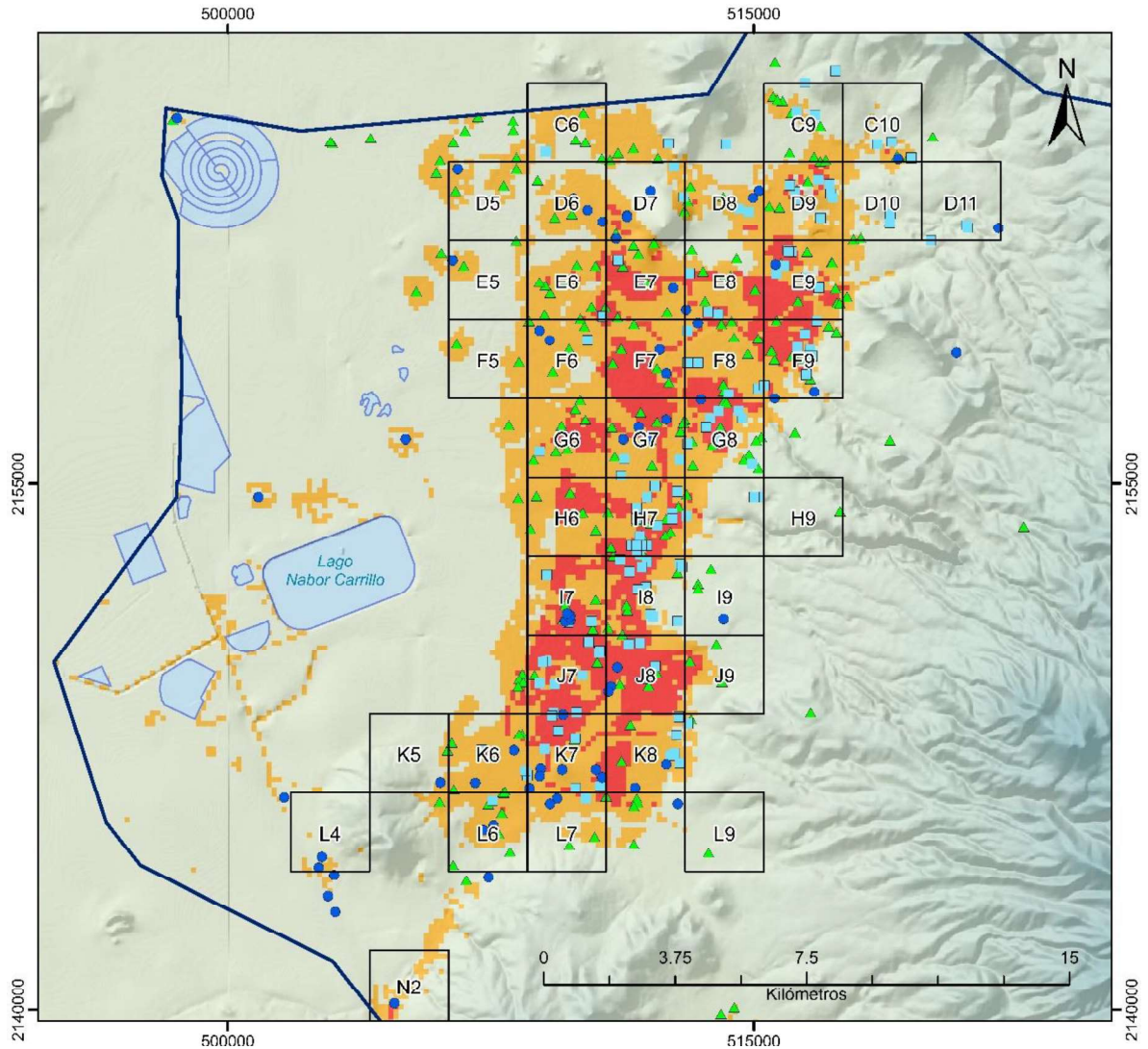
**Uso**

- Público-urbano
- Diferentes usos
- Agrícola

**Piezometría 2018 (msnm)**

- Isolíneas de nivel piezométrico
- Isolíneas inferidas de nivel piezométrico
- Dirección aproximada del flujo del agua subterránea
- Cuadrículas
- Límite del acuífero Texcoco
- Cuerpos de agua

Figura 5.19. Mapa de superposición para la elección de cuadrículas prioritarias. Acuífero Texcoco



**SIMBOLOGÍA**

**Áreas prioritarias de control**

- Prioridad alta
- Prioridad media

**Pozos de extracción**

**Uso**

- Público-urbano
- Diferentes usos
- Agrícola

- Límite del acuífero Texcoco
- Cuerpos de agua
- Cuadrículas

Figura 5.20. Cuadrículas elegidas con pozos potenciales para el monitoreo de calidad del agua subterránea. Acuífero Texcoco

Los pozos seleccionados (propuestos) para la red de monitoreo fueron aquellos de uso público-urbano, diferentes usos y agrícolas, teniendo mayor prioridad de selección los pozos de uso público-urbano. Y entre pozos de igual uso, se seleccionaron los pozos que presentaron el mayor caudal de explotación ( $m^3/año$ ). En las cuadrículas donde no se encontraron pozos de uso público-urbano, se identificaron pozos de diferentes usos o agrícolas, que igualmente presentaron el mayor caudal de explotación.

Por otro lado, las cuadrículas D11, H9, I9 y L9 que se encuentran fuera de las áreas de prioridad, fueron consideradas para selección de pozos que sirvan como línea base de monitoreo. Estos pozos se localizan en las zonas de recarga por lo cual representan la composición y la calidad inicial del agua subterránea. Los pozos propuestos fuera de las áreas prioritarias se registraron en la Tabla 5.11.

**Tabla 5.11.** Pozos propuestos como línea base de monitoreo

No.	Uso	ID Pozo	Propietario	Caudal ( $m^3/año$ )	Cuadrícula
1	Público urbano	1209	Comisión del Agua del Estado de México	801,330	D11
2	Agrícola	234	Ejido Tequexquinahuac, Municipio de Texcoco, Estado de México	50,000	H9
3	Público urbano	1292	Municipio de Texcoco	252,288	I9
4	Agrícola	1695	Unidad de Riego para el Desarrollo Rural "San Juan"	480,000	L9

En la Tabla 5.12 se registraron los pozos seleccionados (propuestos) para la red de monitoreo en áreas de prioridad alta y en la Tabla 5.13 los pozos seleccionados para la red de monitoreo en áreas de prioridad media, mostrándose en ambas tablas el uso del pozo, el identificador (ID), propietario, caudal de explotación, y la cuadrícula en la que se ubica cada pozo.

**Tabla 5.12.** Pozos propuestos como puntos de monitoreo en áreas de prioridad alta

No.	Uso	ID Pozo	Propietario	Caudal de explotación (m <sup>3</sup> /año)	Cuadrícula
1	Público urbano	944	Comité de Agua Potable La Canoa, A. C.	420,480	E9
2	Público urbano	143	Comité de Agua Potable, Vicente Riva Palacio, A. C.	118,000	F6
3	Público urbano	1290	Municipio de Texcoco	551,880	G8
4	Público urbano	1372	Comité de Agua Potable y Alcantarillado El Tejocote, A. C.	126,557	I7
5	Público urbano	1369	Comité de Agua Potable y Alcantarillado El Tejocote, A. C.	126,557	I7
6	Público urbano	1551	Comité de Agua Potable de Santiago Cuautlalpan	315,360	J8
7	Público urbano	1550	Comité de Agua Potable de Santiago Cuautlalpan	189,216	J8
8	Público urbano	1325	Organismo público descentralizado para la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento del municipio de Chicoloapan	700,765	K7
9	Público urbano	1326	Organismo público descentralizado para la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento del municipio de Chicoloapan	944,374	K7
10	Público urbano	9999	Subdirección General de Administración del Agua del Valle de México	9,334,656	N2
11	Diferentes usos	973	José Miguel Rodríguez Fernández, José Miguel, José Antonio, Juan Carlos	450,000	D9
12	Diferentes usos	2664	Purificadora de agua de Texcoco, S. A. De C. V.	25,920	F8
13	Diferentes usos	1410	Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT INT.)	95,550	F9
14	Diferentes usos	1189	Universidad Autónoma Chapingo	105,120	H7
15	Diferentes usos	1192	Universidad Autónoma Chapingo	441,000	H7

**Tabla 5.12.** Pozos propuestos como puntos de monitoreo en áreas de prioridad alta  
(continuación)

No.	Uso	ID Pozo	Propietario	Caudal de explotación (m <sup>3</sup> /año)	Cuadrícula
16	Diferentes usos	1199	Universidad Autónoma Chapingo	226,440	H7
17	Diferentes usos	1174	Colegio de Postgraduados	109,120	I8
18	Diferentes usos	1190	Universidad Autónoma Chapingo	180,000	I8
19	Agrícola	1713	Unidad de Riego para el Desarrollo Rural "Tres Picos"	375,000	E6
20	Agrícola	1718	Unidad de Riego para el Desarrollo Rural "San Cristóbal"	228,000	E7
21	Agrícola	2	Manuel Antonio Arena	175,320	E8
22	Agrícola	2692	Unidad de Riego para el Desarrollo Rural "MECATILLO"	315,000	E9
23	Agrícola	1745	Unidad de Riego para el Desarrollo Rural "Santa Ana"	314,700	F7
24	Agrícola	2668	Unidad de Riego para el Desarrollo Rural "La Resurrección"	210,000	F8
25	Agrícola	1759	Rancho el Batán	123,000	F9
26	Agrícola	1717	Unidad de Riego para el Desarrollo Rural "El Almacigo"	300,000	G6
27	Agrícola	435	Unidad de Riego para el Desarrollo Rural "San Andrés"	402,000	H6
28	Agrícola	1500	Marcos Ortiz Casellas y Miguel Ángel Ortiz Casellas	25,170.00	J7
29	Agrícola	1108	José Ramón Riestra Rubín y María Guadalupe Piedad Riestra Rubín	2,200,000	J9
30	Agrícola	157	Luis Rodríguez Rico	362,880	K8



**Tabla 5.13.** Pozos propuestos como puntos de monitoreo en áreas de prioridad media

No.	Uso	ID Pozo	Propietario	Caudal de explotación (m <sup>3</sup> /año)	Cuadrícula
1	Público urbano	1245	Raúl Díaz Betancourt	1,000	C10
2	Público urbano	1310	H. Ayuntamiento Municipal de Chiautla	82,944	D5
3	Público urbano	1574	Municipio de Chiconcuac	165,216	D6
4	Público urbano	1573	Municipio de Chiconcuac	165,216	D7
5	Público urbano	1580	Municipio de Papalotla	79,388	D8
6	Público urbano	1308	H. Ayuntamiento Municipal de Chiautla	315,360	E5
7	Público urbano	1309	H. Ayuntamiento Municipal de Chiautla	131,400	E7
8	Público urbano	1539	Diócesis de Texcoco, A. R.	12,570	E8
9	Público urbano	404	Comité de agua potable de Santa Cruz de Abajo, Texcoco, Estado de México, A. C.	162,000	F6
10	Público urbano	1297	Municipio de Texcoco	2,424,330	F7
11	Público urbano	1291	Municipio de Texcoco	551,880	G7
12	Público urbano	1295	Municipio de Texcoco	252,288	G7
13	Público urbano	9999	Subdirección General de Administración del Agua	24,282,720	K5
14	Público urbano	1302	Luis Alcántara Melo	2,190	K6
15	Público urbano	1078	Comisión del Agua del Estado de México	977,616	L4
16	Público urbano	1329	Organismo público descentralizado para la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento del municipio de Chicoloapan	1,220,129	L6
17	Público urbano	1330	Organismo público descentralizado para la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento del municipio de Chicoloapan	867,496	L7
18	Diferentes usos	1158	Carlos Goldzweig Speckman	670,000	C6

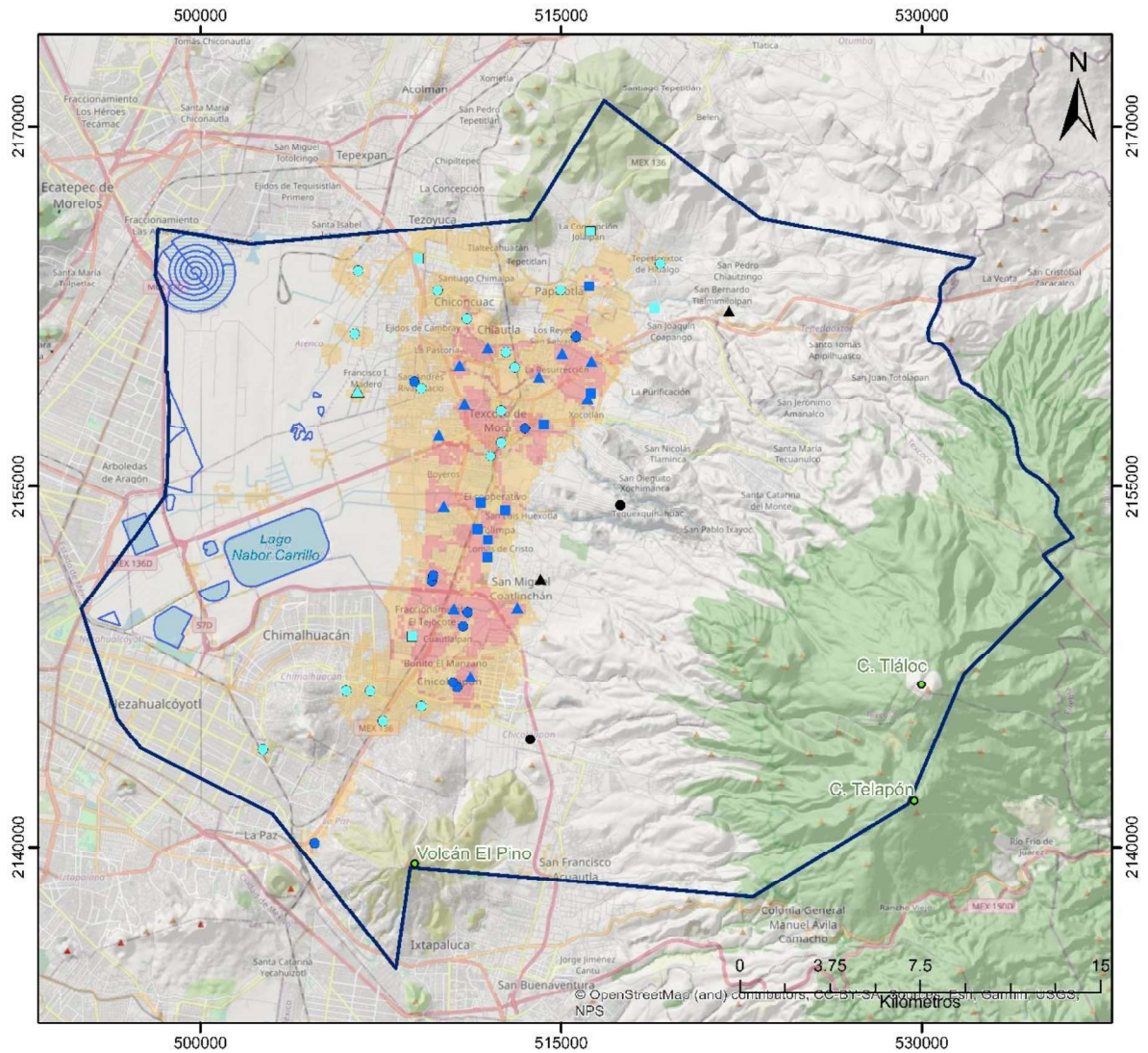
**Tabla 5.13.** Pozos propuestos como puntos de monitoreo en áreas de prioridad media (continuación)

No.	Uso	ID Pozo	Propietario	Caudal de explotación (m <sup>3</sup> /año)	Cuadrícula
19	Diferentes usos	1877	María del Socorro Delgadillo Espinosa, Eloísa Delgadillo Espinoza	5,567	C9
20	Diferentes usos	362	Silvia Rodolfo del Moral, Luis Gonzalo Zermeño Ferrer	69,640	D10
21	Diferentes usos	937	Universidad Autónoma del Estado de México	20,000	J7
22	Agrícola	992	Pozo Espíritu Santo de la Francisco I. Madero, A.C.	1,080,000	F5

En total fueron propuestos 56 pozos para la red de monitoreo, de estos, 30 corresponden a áreas de alta prioridad (Tabla 5.12), 22 a prioridad media (Tabla 5.13), y 4 se encuentran fuera áreas prioritarias (línea base) (Tabla 5.11). En las áreas de alta prioridad se encuentran; 10 pozos de uso público-urbano, 8 de diferentes usos y 12 agrícolas; en las áreas de prioridad media se localizan 17 pozos de uso público-urbano, 4 de diferentes usos y 1 agrícola. La ubicación de los pozos propuestos para el establecimiento de la red de monitoreo de calidad se muestra en la Figura 5.21.

La red de monitoreo final se muestra en la Figura 5.22. Esta propuesta de red de monitoreo de calidad del agua subterránea fue establecida desde el punto de vista técnico. Es importante tener en cuenta que el número de pozos que conformarán la red de monitoreo final estará definido por la autoridad federal, estatal o municipal de aguas, que podría considerar otros criterios (por ejemplo, acceso a pozos, permisos de uso, y características constructivas, entre otros). También dependerá de los recursos financieros disponibles.

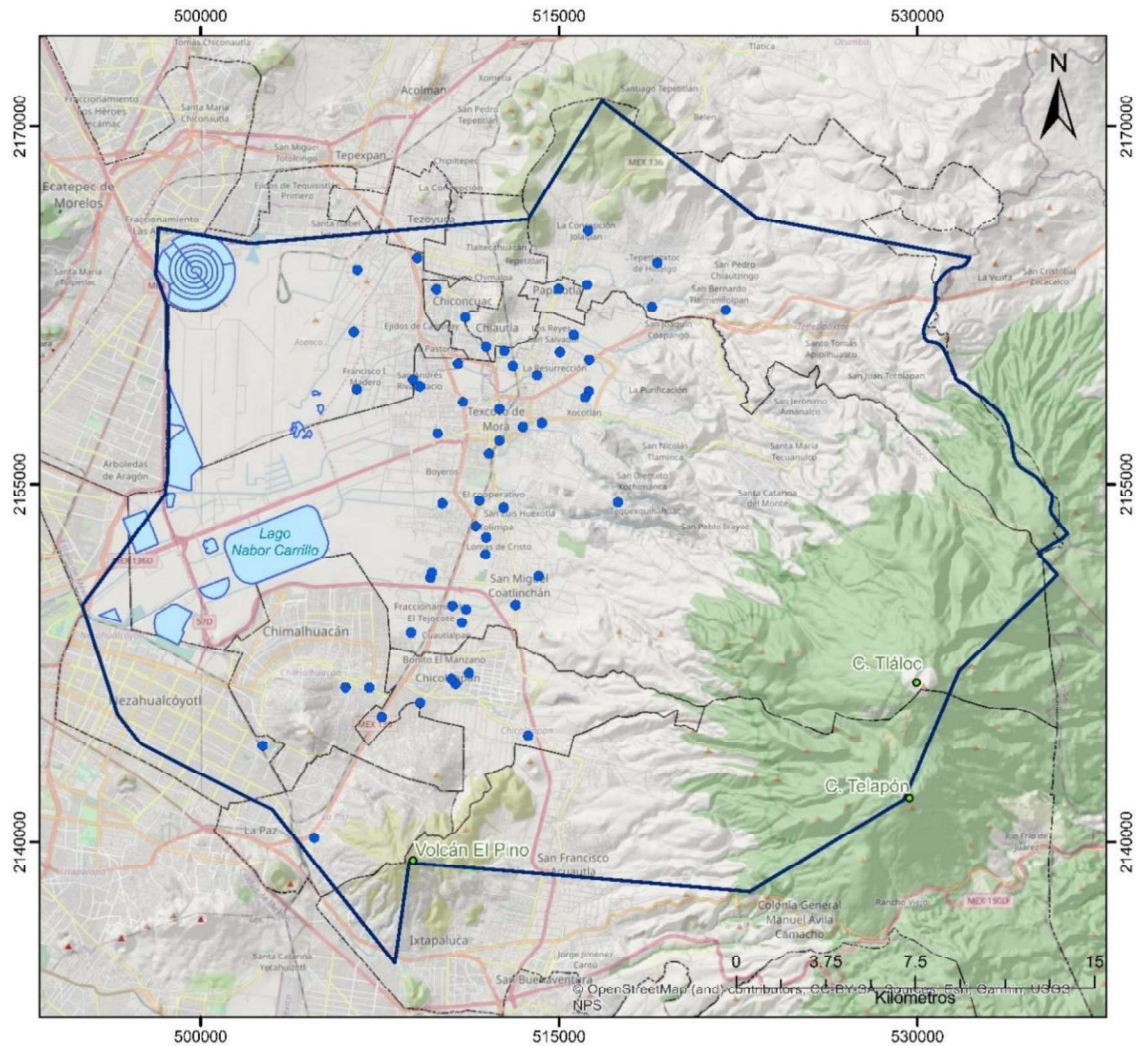
En esta red de monitoreo se propone tomar muestras de agua para realizar análisis físico-químicos *in situ* y en laboratorio, y que permitan conocer las condiciones y el estado actual de la calidad del agua subterránea.



**SIMBOLOGÍA**

- |   |   |
|---|---|
|  Límite del acuífero Texcoco | <b>Pozos en áreas de prioridad media</b>  |
|  Cuerpos de agua             | Uso   |
| <b>Pozos en áreas de prioridad alta</b>   |  Público-urbano  |
| Uso   |  Diferentes usos |
|  Público-urbano              |  Agrícola        |
|  Diferentes usos             | <b>Pozos fuera de áreas de prioridad</b>  |
|  Agrícola                    | Uso   |
|   |  Público-urbano  |
|   |  Agrícola        |

Figura 5.21. Pozos propuestos clasificados según su uso para la red de monitoreo de calidad del acuífero Texcoco



**SIMBOLOGÍA**

- Puntos para el monitoreo de la calidad del agua subterránea
- Límite municipal
- Límite del acuífero Texcoco
- Cuerpos de agua

Figura 5.22. Propuesta de red de monitoreo de calidad del agua subterránea del acuífero Texcoco

Considerando que los niveles piezométricos del acuífero son profundos y no presentan recuperaciones; la evolución de los niveles piezométricos no incide en la temporalidad de los muestreos, sin embargo, en las zonas de recarga si se podrían notar variaciones en los niveles piezométricos, por ello se proponen dos campañas de muestreo: una correspondiente a la temporada de estiaje y otra a la de lluvias; de tal manera que se obtengan muestras representativas de la calidad del agua de recarga (agua más reciente en el acuífero). Frecuentemente, esta calidad es muy diferente de la calidad promedio del agua subterránea contenida en el almacenamiento, a causa de los grandes volúmenes almacenados y los largos tiempos de residencia en el sistema acuífero.

Como propuesta de parámetros a monitorear se definieron los siguientes: *in situ* los parámetros inestables, tales como pH, temperatura del agua, conductividad eléctrica (CE), potencial redox (Eh), oxígeno disuelto (OD), alcalinidad y sólidos disueltos totales (SDT). En este caso es interesante el potencial redox (Eh) y el oxígeno disuelto (OD) ya que en estudios previos sobre hidrogeoquímica y calidad del agua del acuífero (CONAGUA-Proyectos y Servicios, S.A de C.V., 2006; CONAGUA-Ariel Consultores, S.A., 2007; CONAGUA, 2018) se mencionan condiciones reductoras, que facilitarían la movilización de ciertas especies iónicas.

Asimismo, se propone evaluar la presencia de elementos mayoritarios, minoritarios y traza; como: Al, As, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Si y Sr, F<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>; también se recomienda realizar un análisis microbiológico, ya que existe el riesgo de contaminación del agua subterránea por aguas residuales. Se tendrá que hacer especial énfasis en aquellos elementos (Cl<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Mg, Fe y Mn) que se han reportado que superan los límites máximos permisibles que establece la "Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, para agua de uso y consumo humano" (NOM-127-SSA1-1994, 2005) y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> y F<sup>-</sup>, que pueden indicar contaminación del agua. Los muestreos se deben efectuar conforme a la NOM-014-SSA1-1993: Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados, y los estándares de APHA-AWWA-WFPC (2005).

# Conclusiones

La integración de la información geológica e hidrogeológica proporcionó los elementos necesarios para la definición del modelo conceptual hidrogeológico del acuífero. Este modelo ayudó a conocer el funcionamiento del sistema acuífero, a seleccionar y definir los criterios para el diseño de la red de monitoreo, y a elegir el método para determinar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.

Se utilizó la técnica AHP del análisis multicriterio dentro de un marco SIG, para definir las áreas prioritarias de control para el monitoreo de la calidad del agua subterránea, seleccionar los pozos para el monitoreo y, finalmente, establecer la red de monitoreo de calidad de agua subterránea del acuífero Texcoco.

Uno de los principales pasos en el análisis multicriterio es la selección de los criterios que pueden incidir en la priorización de áreas para el monitoreo. Los criterios seleccionados fueron: mapa de peligro de contaminación, áreas de abatimiento del nivel piezométrico, densidad de pozos de extracción y subsidencia; las restricciones fueron los cuerpos de agua y zonas montañosas.

La ponderación de criterios requirió de la opinión de expertos en materia de agua subterránea y SIG. Los pesos relativos fueron obtenidos de manera rápida a través del método AHP, obteniéndose un grado de consistencia aceptable (menor a 0.10). La agregación de los criterios se realizó mediante la suma ponderada.

El mapa resultante define qué áreas deben ser monitoreadas por orden de prioridad, orden que fue reclasificado en las categorías de alta, media y baja prioridad, esto permitió ubicar las áreas prioritarias de control a monitorear.

Para obtener la distribución espacial de la red y determinar la densidad de pozos de monitoreo se determinó un punto de monitoreo en una cuadrícula cuya área fue de 5 km<sup>2</sup>. El mapa de áreas prioritarias de control para el monitoreo fue sobrepuesto con: la malla

(cuadriculas), pozos de uso público-urbano, diferentes usos y agrícolas, piezometría y la dirección del flujo subterráneo, todo lo cual permitió seleccionar las cuadriculas más adecuadas para realizar la selección de pozos.

En total fueron seleccionados 56 pozos para la red de monitoreo, de estos, 30 corresponden a áreas de alta prioridad, 22 a prioridad media, y 4 se encuentran fuera de áreas de prioridad para monitoreo de línea base. Finalmente, se obtuvo el mapa de propuesta de red de monitoreo de calidad del agua subterránea del acuífero Texcoco, el cual puede ser útil para los tomadores de decisiones.

# Recomendaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos en la investigación, se señalan las siguientes recomendaciones:

- Realizar visitas a campo para verificar la condición, funcionalidad y operatividad de los pozos propuestos para la red de monitoreo.
- La construcción y/o habilitación de pozos de monitoreo que aporten datos de la calidad del agua subterránea y de la hidroquímica en el área de estudio.
- Evaluar la calidad del agua subterránea de los pozos ubicados dentro de las áreas de mayor prioridad de atención.
- Incluir pozos de monitoreo en la zona del Ex-Lago de Texcoco, por la posibilidad de producirse agrietamientos y comportarse como vías preferenciales de contaminantes.
- Realizar un estudio de agrietamientos y considerarlo como factor en el AMC.



# Referencias

- Abdurrahman, L., & Gökhan, E. (2019). Hydrochemical and isotopic studies to understand quality problems in groundwater of the Niğde Province, Central Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 78(365), 1-32. doi:<https://doi.org/10.1007/s12665-019-8365-2>
- Appelo, C., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution* (Segunda ed.). Balkema Publishers.
- Arce, J., Layer, P., Luis Macías, J., Morales Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez Domínguez, F., Vásquez Serrano, A. (2019). Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Maps*, 15(2), 320–332. doi:10.1080/17445647.2019.1593251
- Arce, J., Layer, P., Martínez, I., Salinas, J., Macías Romo, M., Morales Casique, E., Lenhardt, N. (2015). Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 123-143.
- Arce, J., Layer, P., Morales-Casique, E., Benowitz, J., Rangel, E., & Escolero, O. (2013). New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology and whole-rock chemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 266, 34-49. doi:10.1016/j.jvolgeores.2013.09.004.
- ASCE. (2003). *Long-term Groundwater Monitoring Design: The State of the Art* (Vol. 4). (A. S. Engineers, Ed.) USA: Environmental and Water Resources Institute (U.S.). Task Committee on the State of the Art in Long-Term Groundwater Monitoring.
- Auge, M. (2006). *Métodos y Técnicas para el Monitoreo de Acuíferos*. Reporte Interno, Universidad de Buenos Aires, Departamento de Hidrogeología.

- Auge, M. (2006). *Métodos y Técnicas para el Monitoreo de Acuíferos*. Reporte Interno, Universidad de Buenos Aires. Obtenido de <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/Monitoreo.pdf>
- Auge, M. (2008). *Hidrogeología ambiental*. Universidad de Buenos Aires , Departamento de Geología.
- Auvinet, G., Méndez, E., & Juárez, M. (2017). *El subsuelo en la Ciudad de México III* (Vol. 3). México: Instituto de Ingeniería. UNAM.
- Auvinet, G., Méndez, E., Juárez, M., Hernández, F., & Martínez, O. (2014). *Avances sobre el agrietamiento del suelo asociado al hundimiento regional en el Valle de México*. Instituto de Ingeniería, UNAM, Sociedad Mexicana De Ingeniería Geotécnica A.C.
- Auvinet, G., Méndez-Sánchez, E., & Juárez-Camarena, M. (2013). Soil Fracturing Induced by Land Subsidence in Mexico City. *Proceedings of International Society For Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2921-2924.
- Auvinet, G., Reséndiz, D., & Méndez, É. (2016). *Subsidencia de la Ciudad de México: un proceso centenario insostenible*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Barranco Salazar, A. (2018). *El agua subterránea y su importancia socioambiental*. El colegio de San Luis.
- Briseño Ruiz, J., Herrera Zamarrón, G., & Júnez Ferreira, H. (2011). Método para el diseño óptimo de redes de monitoreo de los niveles del agua subterránea. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(4), 77-96.
- Bustamante Ibáñez, E. (2017). *Identificación de procesos hidrogeoquímicos aplicando modelación inversa en el acuífero Soconusco, Chiapas*. Tesis de posgrado, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., Geociencias Aplicadas.
- Buzai, G., & Baxendale, C. (2015). Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica marco conceptual basado en la teoría de la geografía. *Ciencias Espaciales*, 8(2), 391-408. doi:10.5377/ce.v8i2.2089

- Cano Casas, L., & Escobar Martínez, J. F. (2011). Diseño de redes de monitoreo apoyadas por herramientas SIG y modelación geoespacial. *Aqua-LAC*, 3(1), 18-25.
- Carranza Edwards, A. (2018). Correlación litológica del subsuelo del lago de Texcoco. *Hidrobiológica*, 28(1), 93-101. doi:doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2018v28n1/Carranza
- Celemín, J. (2014). El proceso analítico jerárquico en el marco de la evaluación multicriterio: un análisis comparativo. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*, 2(6), 47-63.
- Chenini, I., Mammou, A., & El May, M. (2010). Groundwater recharge zone mapping using GIS-based multi-criteria analysis: a case study in Central Tunisia (Maknassy Basin). *Water Resour Manag*(24), 921-939. doi:10.1007/s11269-009-9479-1
- Ching Wu, S., Yuan Ke, K., Tsung Lin, H., & Chi Tan, Y. (2017). Optimization of Groundwater Quality Monitoring Network Using Risk Assessment and Geostatistic Approach. *Water Resour Manage*, 31, 515–530. doi:10.1007/s11269-016-1545-x
- CONAGUA. (2005). *Proyecto Lago de Texcoco. Rescate Hidroecológico. Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala. Gerencia Lago de Texcoco.*
- CONAGUA. (2014). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México.* Subdirección General Técnica, Ciudad de México.
- CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México.* Subdirección General Técnica, Ciudad de México.
- CONAGUA. (2018). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México.* Ciudad de México. Obtenido de [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/edomex/DR\\_1507.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/edomex/DR_1507.pdf)
- CONAGUA-Ariel Consultores, S.A. (2006). *Proyecto de relocalización, reposición y rehabilitación de pozos pertenecientes al programa de acción inmediata (PAI) para*

el año 2006. Comisión Nacional del Agua, Gerencia regional de aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala. Gerencia Técnica, México.

CONAGUA-Ariel Consultores, S.A. (2007). *Estudio hidrogeoquímico, así como de evolución de la calidad del agua subterránea en la Cuenca del Valle de México, año 2007*. CONAGUA, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México Dirección Técnica.

CONAGUA-Proyectos y Servicios, S.A de C.V. (2006). *Estudio de modelación para determinar el comportamiento del acuífero Texcoco (1507)*. Informe.

CONAGUA-Proyectos, Estudios y Servicios, S.A de C.V. (2006). *Estudio de Modelación para determinar el comportamiento de los acuíferos Texcoco y Chalco-Amecameca*.

CONAGUA-UACH. (2010). *Estudio técnico para elaborar el reglamento del uso del agua del acuífero de Texcoco*. Universidad Autónoma Chapingo, Subdirección General Técnica, Texcoco, Estado de México.

Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea, Custodio E., Llamas M.* (2° ed., Vol. Tomo 1). Barcelona, España: Omega S.A.

Daanoba Sunkari , E., & Bauch Danladi, I. (2016). Assessment of trace elements in selected bottled drinking water in Ghana: a case study of Accra metropolis. *International Journal of. Water Resources and Environmental Engineering*, 8(10), 137-142. doi:10.5897/IJWREE2016.0685

Daughney, C., Raiber , M., Moreau-Fournier, M., Morgenstern , U., & Raaij, R. (2012). Use of hierarchical cluster analysis to assess the representativeness of a baseline groundwater quality monitoring network: comparison of New Zealand's national and regional groundwater monitoring programs. *Hydrogeology Journal*, 20, 185–200. doi:10.1007/s10040-011-0786-2

Dávila Pórcel, R., & De León Gómez, H. (2011). Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(3), 463-477. doi:10.18268/BSGM2011v63n3a8

- DGA. (2019). *Criterios para implementación de redes de monitoreo de aguas subterráneas*. Gobierno de Chile, Dirección General de Aguas. Santiago de Chile: División de Estudios y Planificación.
- Díaz Caravantes, R. E., Bravo Peña, L. C., Alatorre Cejudo, L. C., & Sánchez Flores, E. (2014). Análisis geoespacial de la interacción entre el uso del suelo y de agua en el área periurbana de Cuauhtémoc, Chihuahua. Un estudio socioambiental en el norte de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*(83), 116-130. doi:10.14350/rig.32694.
- DOF. (2019). *Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Texcoco, clave 1507, en el Estado de México, región hidrológico-administrativa XIII, Aguas del Valle de México*. Estudio Técnico, Comisión Nacional del Agua. Obtenido de [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5572270&fecha=13/09/2019&print=true](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5572270&fecha=13/09/2019&print=true)
- Escolero, O., Kralisch, S., Martínez, S., & Perevochtchikova, M. (2016). Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 409-427. doi:10.18268 / BSGM2016v68n3a3
- Esquivel Martínez, J. (2011). *Uso de los SIG para el rediseño de las redes existentes de monitoreo de cantidad y calidad del agua subterránea: Acuífero del Valle de Toluca*. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de ingeniería. Toluca: Tesis de Maestría UAEMex.
- Esquivel Martínez, J. (2015). *Diseño óptimo de redes dinámicas de monitoreo de agua subterránea mediante el uso de SIG y escenarios hidrogeológicos*. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería. Toluca: Tesis doctoral UAEMEX.

- Esquivel Martínez, J., Morales, G., & Esteller, M. (2015). Groundwater Monitoring Network Design Using GIS and Multicriteria Analysis. *Water Resour Manage*(29), 3175-3194. doi:10.1007/s11269-015-0989-8
- Esri. (2020). *ArcMap*. (esri) Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/tools/spatial-analyst-toolbox/how-weighted-sum-works.htm>
- Foster, S., & Chilton, P. (2003). Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. *The Royal Society*, 1957–1972. doi:10.1098/rstb.2003.1380
- Foster, S., Garduño, H., Kemper, K., Tuinhof, A., Nanni, M., & Dumars, C. (2006). *Protección de la Calidad del Agua Subterránea definición de estrategias y establecimiento de prioridades*. Banco Mundial. Washington D.C., EE. UU.: WG-MATE.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elía, M., & París, M. (2007). *Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales* (Segunda ed.). (B. Mundial, Ed.)
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *GROUNDWATER*. Cathy Brenn/Kim McNeily.
- Fries, Jr., C. (1960). Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México. *Boletín del Instituto de Geología*, 60, 236.
- García-Palomo, A., Macías, J., Jiménez, A., Tolson, G., Mena, M., Sánchez-Núñez, J., . . . Lermo-Samaniego, J. (2018). Extensión Plioceno-Cuaternario NW-SE en la región Apan-Acocolco, Cinturón Volcánico Trans-Mexicano Oriental. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 349, 240-255. doi:10.1016/j.jvolgeores.2017.11.005
- García-Palomo, A., Zamorano, J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., & Macías, J. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(1), 158-178.

- Gómez Evangelista, B. (2016). Lago de Texcoco: Consecuencias de impacto ambiental. *TEPEXI Boletín Científico De La Escuela Superior Tepeji Del Río*, 3(6), 4-7. doi:10.29057/estr.v3i6.372
- González Torres, E., Morán Zenteno, D., Mori, L., & Martiny, B. (2015). Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 285-297.
- Guzmán-Quintero, A., Palacios-Vélez, O., Carrillo-González, R., Chávez-Morales, J., & Nikolskii-Gavrilov, I. (2007). La contaminación del agua superficial en la Cuenca del Río Texcoco, México. *Agrociencia*, 41, 385-393.
- Hajkovicz, S., & Collins, K. (2007). A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resour Manag*(21), 1553-1566. doi:10.1007/s11269-006-9112-5
- Holland, M., & Witthüser, K. (2009). Geochemical characterization of karst groundwater in the cradle of humankind world heritage site, South Africa. *Environmental Geology*, 57(3), 513–524. doi:10.1007/s00254-008-1320-2
- Huizar-Alvarez, R., Carrillo-Rivera, J., Ángeles-Serrano, G., Hergt, T., & Cardona, A. (2004). Chemical response to groundwater extraction southeast of Mexico City. *Hydrogeology Journal*, 12, 436–450. doi:10.1007/s10040-004-0343-3
- IDEAM, & INVEMAR. (2018). *Protocolo de monitoreo del agua*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá D.C.
- IGCEM. (2016). *Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México*. Recuperado el 2020, de <http://acvisor.edomex.gob.mx/AtlasCibernetico/portal/visorAtlas.do>
- IGRAC. (2019). *GROUNDWATER IN A CHANGING WORLD. IGRAC STRATEGY 2019–23*.

- INEGI. (2005). *II Censo de Población y Vivienda 2005*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2005/>
- INEGI. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- INEGI. (2015). *Encuesta Intercensal 2015*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/?ps=microdatos>
- INEGI. (2018). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 2020, de <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/>
- INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Obtenido de [https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Datos\\_abiertos](https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Datos_abiertos)
- Kumar, M., Kumari, K., Kumar Singh, U., & Ramanathan, A. (2009). Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Muktsar, Punjab: conventional graphical and multivariate statistical approach. *Environ Geol*(57), 873-884. doi:10.1007/s00254-008-1367-0
- Leyva Suárez, E. (2010). *Acuíferos semiconfinados y su modelación: aplicaciones al acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Geociencias , México. Obtenido de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/98099>
- Li, P., Jianhua, W., & Qian, H. (2015). Hydrochemical appraisal of groundwater quality for drinking and irrigation purposes and the major influencing factors: a case study in and around Hua County, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(1), 1-17. doi:10.1007/s12517-015-2059-1
- Loaiciga, H., Charbeneau, R., Everett, L., Fogg, G., Hobbs, B., & Rouhani, S. (1992). Review of groundwater quality monitoring network design. *Journal Hydraulic Engineering. ASCE*, 118(1), 11-32.



- López Martínez, L. R. (2019). *Anteproyecto de Recarga Artificial del Acuífero en la Zona Federal del Ex Lago de Texcoco*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México.
- López Velandia, C. (2018). Análisis de las características fisicoquímicas del agua subterránea de la cuenca del río Chicú, Colombia, usando indicadores hidroquímicos y estadística multivariante. *Ingeniería y Ciencia*, 14(28), 35–68. doi:10.17230/ingciencia.14.28.2
- MacDonald, A. M., Bonsor, H. C., Dochartaigh, B. E., & Taylor, R. (2012). Quantitative maps of groundwater resources in Africa. *Environmental Research Letters*, 7(2), 7-10. doi:10.1088/1748-9326/7/2/024009
- Martín del Campo, M., Esteller Alberich, M., Expósito Castillo, J., & Hirata, R. (2014). Impacts of urbanization on groundwater hydrodynamics and hydrochemistry of the Toluca Valley aquifer (Mexico). *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(5), 2979-2999. doi:10.1007/s10661-013-3595-3
- Martínez Rodríguez, E. (2007). Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, XL, 523-542.
- Mendoza Archundia, E. (2012). *Caracterización hidrogeológica de la porción sureste de la planicie de Texcoco, México, para establecer sitios de recarga artificial al acuífero*. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México.
- Mooser, F. (1961). *Informe sobre la geología de la cuenca del Valle de México y zonas colindantes (No. 557.25 C6)*. Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México.
- Morán Ramírez, J. (2016). *Modelación Hidrogeoquímica en Tres Ambientes Naturales en México: Kárstico, Volcánico y Cuenca Sedimentaria*. Tesis doctoral, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., Posgrado en Ciencias Aplicadas, San Luis Potosí.
- Morell, I., & Renau Pruñonosa, A. (2019). Groundwater pollution. Some case studies. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 27(1), 1-15.

- Muñoz Medina, B., & Romana García, M. (2016). Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte. *Dialnet*, 6(2), 27-45.
- Muñoz, B., & Romana , M. (2016). Application of Multicriteria Decisions Methods in Evaluating Alternative Solutions for Transportation Facilities. *GIE Pensamiento Matemático y Grupo de Investigación MAIC*, VI(2), 027-046.
- NOM-127-SSA1-1994. (2005). *Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Diario Oficial de la Federación (DOF) SSA-2005.
- OMS. Organización Mundial de la Salud. (2004). *Guías para la calidad del agua potable* (Tercera ed., Vol. 1).
- Oviedo de León, A. (1967). *Estudio geológico del subsuelo, basado en los datos obtenidos de la perforación del pozo profundo Texcoco No. 1*. Instituto Mexicano de Petróleo Departamento de Geología y Exploración, México.
- Pazand, K., Khosravi, D., Reza Ghaderi, M., & Reza Rezvaniyanzadeh, M. (2018). Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater in a semi-arid region using major ion chemistry: A case study of Ardestan basin in Central Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 6, 245-254. doi:10.1016/j.gsd.2018.01.008
- Peters, E., Campoy Favela, J., & Flessa, K. (2009). *Ciénega de Santa Clara. Comprehensive Monitoring Program*. Instituto Nacional de Ecología, México. (SEMARNAT). Obtenido de <http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/cienega.pdf>
- Prado Hernández, J., Hernández Jaimes, Z., Téllez Pulido, Ó., Carrillo García, M., Gutiérrez Carrillo, N., & Vázquez Alarcón, A. (2017). Water quality for human consumption and agricultural use of some wells in the Texcoco aquifer (1507). *SABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*. Paper Number: 1700171, 1-8. doi:10.13031/aim.201700171

- Preziosi, E., Petrangeli, A., & Giuliano, G. (2013). Tailoring groundwater quality monitoring to vulnerability: a GIS procedure for network design. *Environ Monit Assess*, 185, 3759–3781. doi:10.1007/s10661-012-2826-3
- Rahmati, O., Nazari Samani, A., Mahdavi, M., Reza Pourghasemi, H., & Zeinivand, H. (2015). Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9), 7059–7071. doi:10.1007/s12517-014-1668-4
- Rentier, C., Delloye, F., Brouyere, S., & Dassargues, A. (2006). A framework for an optimised groundwater monitoring network and aggregated indicator. *Hydrogeology and Environmental Geology*(50), 94-201.
- REPDA. (2019). *Registro Público de Derechos de Agua*. Recuperado el 2019, de <https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx>
- Reséndiz, D., Auvinet, G., & Méndez, É. (2016). *Subsidencia de la Ciudad de México: un proceso centenario insostenible*. Instituto de Ingeniería UNAM. México: SERIE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO.
- Rivett, M., Miller, A., MacAllister, D., Fallas, A., Wanangwa, G., Mleta, P., . . . Kalin, R. (2018). A conceptual model based framework for pragmatic groundwater-quality monitoring network design in the developing world: Application to the Chikwawa District, Malawi. *Groundwater for Sustainable Development*, 6, 213–226. doi:10.1016/j.gsd.2018.01.005
- Rodríguez Barrón, M. E. (2010). *Caracterización Geoestadística del subsuelo del ex-lago de Texcoco*. Tesis de posgrado, Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería y Arquitectura, México.
- Saaty, T. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26. doi:10.1016/0377-2217(90)90057-I
- Sánchez Hernández, J. (2013). *Redes de monitoreo del agua subterránea en el Acuífero del Valle de Toluca. Propuesta de su distribución espacial mediante el manejo de*

*factores hidrogeológicos, ambientales y socioeconómicos.* Tesis Licenciatura ,  
Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Geografía, Toluca.

Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP). (1969). *Proyecto Texcoco, memoria de los trabajos realizados y conclusiones, Fiduciaria Nacional Financiera S.A, Ciudad de México.*

SEMARNAT. (2009). *Ciénega de Santa Clara. Comprehensive Monitoring Program* (Primera ed.). México: Publicación especial del Instituto Nacional de Ecología, México.

Simoh. (2015). *Sistema de Monitoreo de la Piezometría y de los Hundimientos del Valle de México por Extracción de Agua Subterránea.* Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Suárez Romero, P. (2019). *Modelo matemático de flujo del acuífero de Texcoco, como una herramienta de gestión y planificación hídrica para el desarrollo sustentable de la región.* Tesis, Universidad Nacional Autónoma De México, Facultad de ingeniería, México.

Taheri, K., Missimer, T., Amini, V., Bahrami, J., & Omidipour, R. (2020). A GIS-expert-based approach for groundwater quality monitoring network design in an alluvial aquifer: a case study and a practical guide. *Environ Monit Assess*, 192(684), 2-19. doi:10.1007/s10661-020-08646-y

Tóth, J. (1999). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*, 111(4), 9-26.

Trucíos-Caciano, R., Estrada-Ávalos, J., Cerano-Paredes, J., & Rivera-González, M. (2011). Interpretación del cambio en vegetación y uso de suelo. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 359-367. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792011000400359#B3](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000400359#B3)

Tuinhof, A., Foster, S., Kemper, K., Garduño, H., & Nanni, M. (2006). *Requerimientos de Monitoreo del Agua Subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las*

*amenazas a la calidad del agua*. Banco Mundial. Washington D.C., EE. UU.: WGMATE.

- UNAM, & CNDH. (2018). *Estudio sobre la protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos*. (C. d. Humanidades-UNAM, Ed.) México.
- Unda López, J. (2016). *Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del Valle de México*. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- UNDP, UNEP, WB, & WRI. (2000). *A GUIDE TO WORLD RESOURCES 2000–2001: People and Ecosystems: The Fraying Web of Life*. Washington.
- Vallejo López, G., Vieira Samper, P., & Pineda González, C. (2014). *Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Vargas Quintero, M. (2010). *Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Dirección de Ecosistemas–Grupo de Recurso Hídrico, Bogotá.
- Vázquez Sánchez, E., & Jaimes Palomera, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Revista de la Union Geofísica Mexicana*, 28(2), 136-182.
- Yuce, G., Pinarbasi, A., Ozcelik, S., & Ugurluoglu, D. (2006). Soil and water pollution derived from anthropogenic activities in the Porsuk River Basin, Turkey. *Environmental Geology*, 49(6), 359-375. doi:10.1007/s00254-006-0175-7
- Zaporozec, A., Conrad, J., Hirata, R., Per Olof, J., Nonner, J., Romijn, E., & Weaver, J. (2002). *Groundwater contamination inventory: a methodological guide*. UNESCO. HP-VI, Series on Groundwater No. 2.