



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA



# **SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL DEL FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, EN EL ACUÍFERO TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

## **TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTER EN CIENCIAS DEL AGUA**

**PRESENTA:**

**JORGE ALBERTO GOMEZ GOMEZ**

**TUTOR ACADÉMICO:**

**DRA. MARÍA VICENTA ESTELLER ALBERICH**

**TUTORES ADJUNTOS:**

**DR. JOSÉ LUIS EXPÓSITO CASTILLO**

**DRA: CAROLINA MASSIEL MEDINA RIVAS**

**Diciembre 2021, Toluca, Estado de México**

## **Síntesis**

El agua es un recurso renovable, pero limitado. La creciente demanda de este líquido a nivel mundial ha provocado el desarrollo de nuevas herramientas que permitan la gestión integral de este recurso. La mayor parte de la población mundial es abastecida de fuentes de agua subterráneas, administrando y sobreexplotando indiscriminadamente las mismas. En la actualidad una herramienta que ayuda a lograr una correcta gestión y administración del mencionado recurso es la modelación matemática.

En el mundo las herramientas más difundidas con este fin son, MODFLOW y FEFLOW. En México desde hace varias décadas con el objetivo de estudiar y comprender la compleja dinámica de las aguas subterráneas, se ha dado un importante salto cualitativo, referente a la modelación matemática del agua subterránea.

En la presente investigación se hace una extensa búsqueda de información sobre el Acuífero Texcoco e investigaciones realizadas con anterioridad en la zona para a través del uso del software Visual MODFLOW Flex implementar un modelo numérico de flujo de aguas subterráneas de la zona. Esta tarea se estructuró en el siguiente orden, primero se recopiló información sobre modelos numéricos e investigaciones desarrolladas anteriormente en la zona, así como la información necesaria para crear la cartografía de esta.

Posteriormente se procedió a la elaboración de un modelo Conceptual Hidrogeológico en el cual se integraron los mecanismos de recarga y descarga que se identificaron de la zona. Con la ayuda del software anteriormente mencionado se desarrolló dicho modelo conceptual y a partir de este se implementó el modelo numérico de flujo de aguas subterráneas.

El modelo numérico de flujo permitió llevar a cabo numerosos escenarios de calibraciones para aproximar con mayor exactitud los valores calculados por este y los valores observados en los pozos de la red de monitoreo de la zona del Acuífero Texcoco. Se logró disminuir el error cuadrático medio de las diferencias (NRMS) para el año 2018 a un valor de 11.74%, logrando representar de esta forma las entradas y salidas de aguas al sistema.

## **Abstract**

Commonly in numerical groundwater models, the hydraulic and physical parameters are obtained through a calibration process from observed aquifer conditions. This calibration process consists of solving an optimization problem where the differences between the variables measured and those simulated by the model are minimized. The Texcoco Aquifer, State of Mexico is one of the most overexploited in the Mexican Republic and it is necessary to have tools and mechanisms to speed up and optimize times and make better decisions when managing water resources. The implementation of a numerical flow model that allows the incorporation of new information that may arise over time and that can feed it is a powerful tool that can be had when managing the underground resources of the Texcoco Aquifer. In this research, a numerical flow model for the aquifer was implemented and it is intended that it can be useful when making better decisions and that it allows a correct management of water resources in the territory.

## **Resumen**

Comúnmente en los modelos numéricos de agua subterránea los parámetros hidráulicos y físicos se obtienen mediante un proceso de calibración a partir de condiciones acuíferas observadas. Este proceso de calibración consiste en resolver un problema de optimización donde se minimizan las diferencias entre las variables medidas en la realidad y las simuladas por el modelo. El Acuífero Texcoco, Estado de México es uno de los más sobreexplotados de la República Mexicana y es necesario contar con herramientas y mecanismos que permitan agilizar y optimizar los tiempos y la toma de mejores decisiones a la hora de gestionar el recurso agua. La implementación de un modelo numérico de flujo que permita la incorporación de nueva información que pueda surgir en el transcurso del tiempo y que pueda alimentarlo es una herramienta poderosa que se puede tener a la hora de gestionar los recursos subterráneos del Acuífero Texcoco. En la presente investigación se implementó un modelo numérico de flujo para el acuífero y se pretende que pueda ser de utilidad a la hora de tomar mejores decisiones y que permita una correcta gestión de los recursos hídricos en el territorio.

## Contenido

Agradecimientos .....	ii
Dedicatoria.....	iii
Síntesis .....	iv
Abstract.....	v
Resumen.....	v
Contenido.....	vi
Índice de figuras.....	ix
Índice de tablas .....	xi
Listado de acrónimos, siglas y abreviaturas .....	xii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Justificación científica y contextual.....	2
1.3. Hipótesis de investigación .....	2
1.4. Objetivos de investigación.....	3
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	4
2.1. Los recursos hídricos subterráneos .....	4
2.2. Manejo sustentable de acuíferos .....	5
2.3. Modelación matemática de acuíferos.....	6
CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	10
3.1. Localización y características generales .....	10
3.2. Características físicas.....	13
3.2.1. Rasgos topográficos.....	13
3.2.2. Edafología.....	15
3.2.3. Uso de suelo y cobertura vegetal .....	17
3.2.4. Clima.....	18
3.2.5. Población y desarrollo socioeconómico.....	20
3.2.6. Situación administrativa del acuífero.....	21
3.3. Geología.....	21
3.4. Hidrología superficial .....	29
3.5. Hidrología subterránea.....	30

CAPÍTULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS .....	37
4.1. Recopilación, análisis y procesamiento de la información disponible .....	37
4.2. Desarrollo del modelo conceptual hidrogeológico del acuífero Texcoco.....	39
4.3. Implementación del modelo numérico de flujo al acuífero Texcoco .....	42
4.3.1. Definición del dominio y discretización.....	42
4.3.1.1. Dominio del modelo .....	42
4.3.1.2. Discretización horizontal .....	43
4.3.1.3. Discretización vertical .....	43
4.3.1.4. Discretización temporal .....	44
4.3.2. Parámetros hidrodinámicos del acuífero.....	44
4.3.3. Condiciones de fronteras .....	44
4.3.4. Condiciones iniciales .....	49
4.3.5. Bombeos y extracción.....	50
4.3.6. Calibración del modelo.....	50
CAPÍTULO V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	52
5.1. Procesamiento de la información.....	52
5.2. Desarrollo de un modelo conceptual hidrogeológico del acuífero Texcoco.....	53
5.2.1. Definición de las unidades hidroestratigráficas y parámetros hidráulicos.....	53
5.2.1.1. Unidades hidroestratigráficas.....	53
5.2.1.2. Parámetros hidráulicos.....	58
5.2.2. Análisis de la evolución piezométrica .....	58
5.2.3. Estimación de la recarga vertical de agua subterránea .....	67
5.2.4. Entradas y salidas horizontales al acuífero .....	67
5.2.5. Descarga de agua subterránea.....	68
5.2.5.1. Extracción del agua subterránea con base en los datos de Censos de aprovechamientos .....	68
5.2.5.2. Volúmenes concesionados en el REPDA y usos principales del agua subterránea .....	71
5.2.6. Modelo conceptual hidrogeológico del acuífero Texcoco.....	72
5.3. Modelación numérica del flujo de agua subterránea del acuífero Texcoco.....	74
5.3.1. Dominio del modelo y discretización .....	74
5.3.1.1. Dominio del modelo .....	74
5.3.1.2. Discretización horizontal .....	76

5.3.1.3. Discretización vertical .....	78
5.3.1.4. Discretización temporal .....	81
5.3.2. Parámetros hidrodinámicos del acuífero.....	81
5.3.3. Condiciones de frontera .....	84
5.3.4. Condiciones iniciales .....	86
5.3.5. Bombeos y extracción.....	86
5.3.5. Simulación inicial de flujo de aguas subterráneas para el año 2006.....	87
5.3.6. Simulación de flujo de aguas subterráneas en estado transitorio para el período comprendido entre los años 2006 y 2018 .....	89
5.3.7. Calibración del modelo numérico de flujo .....	91
5.3.7. Balance general en el Acuífero Texcoco para el periodo 2006 – 2018 .....	93
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES PARCIALES Y RECOMENDACIONES.....	96
6.1. Conclusiones .....	96
6.2. Recomendaciones .....	97
Referencias bibliográficas.....	99
Anexos 1 .....	107

## Índice de figuras

Figura 3.1. Puntos de la poligonal simplificada del acuífero Texcoco. ....	11
Figura 3.2. Localización del acuífero Texcoco. Fuente: Con base en CONAGUA (2018 <sup>a</sup> ). ....	12
Figura 3.3. Mapa hipsográfico del acuífero Texcoco. Fuente: IFOMEGEM, 2013. ....	15
Figura 3.4. Mapa edafológico del acuífero Texcoco. Fuente: INEGI, 2014. ....	16
Figura 3.5. Mapa de uso de suelos del acuífero Texcoco. Fuente: INEGI, 2017. ....	18
Figura 3.6. Mapa de climas del acuífero Texcoco. Fuente: IFOMEGEM, 2014. ....	19
Figura 3.7. Mapa geológico del acuífero Texcoco. ....	24
Figura 3.8. Sección hidrogeológica A-A' del acuífero Texcoco, Tomada de Suárez, 2019. ....	25
Figura 3.9. Sección hidrogeológica B-B' del acuífero Texcoco, Tomada de Suárez, 2019. ....	26
Figura 3.10. Columna estratigráfica obtenida del pozo profundo PP-1 Texcoco. Tomada de Lojero-Ochoa, 2014. ....	27
Figura 3.11. Mapa hidrológico del acuífero de Texcoco. Fuente: IFOMEGEM, 2013. ....	30
Figura 3.12. Sección hidrogeológica A-A'. Tomada de Suárez, 2019. ....	32
Figura 3.13. Mapa de distribución de los acuíferos en la zona. ....	33
Figura 3.14. Mapa de elevación del nivel estático del acuífero Texcoco. CONAGUA, 2018a. ..	35
Figura 3.15. Mapa de elevación del nivel del acuífero Texcoco. Suárez, 2019. ....	36
Figura 4.1. Desarrollo del modelo conceptual hidrogeológico. Modificado de Medina, 2017. ...	37
Figura 4.2. Desarrollo de un modelo conceptual hidrogeológico. Fuente: Vélez (2010). ....	40
Figura 4.3. Cálculo de celdas de entrada y salida al acuífero. Elaboración con base en CONAGUA, 2018. ....	46
Figura 4.4. Calibración de un modelo de flujo de aguas subterráneas por prueba y error (SEA, 2012). ....	51
Figura 5.1. Mapa de piezometría para el año 2006. ....	61
Figura 5.2. Mapa de piezometría para el año 2018. ....	63
Figura 5.3. Evolución del nivel piezométrico del pozo de observación: ER-14. ....	64
Figura 5.4. Mapa de evolución piezométrica para el periodo 2006-2018. ....	65
Figura 5.5. Evolución del nivel piezométrico del pozo de observación: EB-15. ....	66
Figura 5.6. Evolución del nivel piezométrico del pozo de observación: EJ-86. ....	66
Figura 5.7. Evolución del nivel piezométrico del pozo de observación: EJ-20. ....	67
Figura 5.8. Distribución de los pozos registrados en el censo del año 2006. Fuente: CONAGUA, 2006. ....	70

Figura 5.9. Pozos de extracción localizados en el Acuífero Texcoco. Fuente: Elaborado con base en los datos del REPDA, 2019.....	72
Figura 5.10. Modelo conceptual hidrogeológico del acuífero Texcoco. Elaboración propia. ....	73
Figura 5.11. Dominio del modelo en el acuífero Texcoco. ....	75
Figura 5.12. Dominio del modelo y discretización horizontal.....	77
Figura 5.13. Discretización vertical del dominio del modelo representado en Visual Modflow Flex (fila 109). ....	79
Figura 5.14. Discretización vertical del dominio del modelo representado en Visual Modflow Flex (columna 97). ....	80
Figura 5.15. Distribución espacial de la conductividad hidráulica $K_x$ y $K_y$ en la capa 1 del modelo.....	82
Figura 5.16. Distribución espacial de la conductividad hidráulica $K_z$ en la capa 1 del modelo. .	83
Figura 5.17. Distribución espacial de la recarga del modelo numérico de flujo. ....	85
Figura 5.18. Simulación de flujo de aguas subterráneas en estado estacionario para el año 2006 (msnm). ....	88
Figura 5.19. Distribución espacial de la nueva frontera del modelo y los pozos de extracción y observación. ....	90
Figura 5.20. Simulación de flujo de aguas subterráneas en estado transitorio para el año 2018 (msnm). ....	92
Figura 5.21. Balance general para el Acuífero Texcoco para el período de 2006- 2018.....	94
Figura 5.22. Valores calibrados vs valores observados para el año 2018 (msnm). ....	95

## Índice de tablas

Tabla 3.1. Coordenadas de la poligonal del acuífero Texcoco. ....	13
Tabla 3.2. Número de habitantes comprendidos entre los límites del acuífero Texcoco. Estado de México. Fuente: INEGI, 2015. ....	21
Tabla 3.3. Secuencia estratigráfica en la cuenca de México y el acuífero Texcoco (Suarez, 2019). ....	28
Tabla 3.4. Pozos de la red de monitoreo en el acuífero Texcoco utilizados para la configuración piezométrica del año 2018. ....	34
Tabla 4.1. Insumos necesarios para el desarrollo de la investigación. ....	39
Tabla 4.2. Coeficiente de escurrimiento, según el método de Benítez et al., 1980 ....	48
Tabla 5.1. Unidades hidroestratigráficas del acuífero Texcoco. Elaborada con datos de Suárez, 2019. ....	57
Tabla 5.2. Pozos de la red de monitoreo en el Acuífero Texcoco utilizados para la configuración piezométrica del año 2006. ....	59
Tabla 5.3. Pozos de la red de monitoreo en el Acuífero Texcoco utilizados para la configuración piezométrica del año 2018. ....	62
Tabla 5.4. Valores de abatimientos del nivel del agua subterránea (m) en el periodo 2074 - 2018, en el Acuífero Texcoco. ....	64
Tabla 5.5. Elementos de balance del modelo Conceptual Hidrogeológico. Información modificada de CONAGUA 2018 ....	73
Tabla 5.6. Distribución de las capas del modelo numérico de flujo del acuífero Texcoco. ....	78
Tabla 5.7. Conductividad por unidad hidroestratigráfica ....	81
Tabla 5.8. Coeficientes de almacenamiento y porosidades ....	82
Tabla 5.9. Propiedades del modelo numérico antes de la calibración. ....	91
Tabla 5.10. Propiedades del modelo numérico después de la calibración. ....	91
Tabla 5.11. Balance general para el año 2018 ....	93

## **Listado de acrónimos, siglas y abreviaturas**

CAEM	Comisión del Agua del Estado de México
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CGIAR-CSI	Consultative Group on International Agricultural Research Consortium for Spatial Information
CIGSA	Consortio de Ingenieros de Guanajuato S.A. de C.V.
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
COPEI	Consultoría de Prácticas Educativas Innovadoras
DAYMET	Daily Surface Weather and Climatological Summaries
DEM	Modelo Digital de Elevaciones
DOF	Diario Oficial de la Federación
IFOMEGEM	Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México
IG-UNAM	Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de México
II-UNAM	Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IITCA	Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua
NAICM	Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México
OCAVM	Organismo de Cuencas de Aguas del Valle de México
PAI	Programa de Acción Inmediata
REPDA	Registro Público de Derechos de Agua
SACMEX	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEV	Sondeos Eléctricos Verticales
SDT	Sólidos Disueltos Totales
SGM	Servicio Geológico Mexicano
SHCP	Secretaría de Hacienda y Crédito Público
SIG	Sistema de Información Geográfica
SMN	Servicio Meteorológico Nacional

*Listado de acrónimos, siglas y abreviaturas*

---

TEM	Sondeo Electromagnético en el dominio del Tiempo (Tomografía Resistiva)
UAM	Universidad Autónoma Metropolitana
UAEM	Universidad Autónoma del Estado de México
UACH	Universidad Autónoma de Chapingo
UNAM	Universidad Autónoma de México
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

El uso y conservación de los recursos naturales constituye uno de los principales problemas que enfrenta la sociedad en su conjunto a escala global (Olalekan et al., 2019). Uno de los principales problemas es el referente a la sobreexplotación del agua subterránea y la gestión de éstas. Se estima que el 20% de los acuíferos del mundo están sobreexplotados (Arévalo, 2018) y que, a nivel mundial, 2500 millones de personas dependen exclusivamente de los recursos de aguas subterráneas para satisfacer sus necesidades básicas diarias (WWAP/UNESCO, 2015).

Según Klink (2018), la gestión del agua no es exclusivamente un problema de carácter ingenieril o técnico, sino de política social. El conocimiento científico juega un papel clave en dicha gestión y más aún en zonas con una alta densidad poblacional y con una dependencia primordial del agua subterránea para satisfacer sus necesidades como es el caso del Valle de México. Para gestionar el agua subterránea se requiere de normas específicas, medios económicos, coordinación por parte de la autoridad, y fundamentalmente de metas claras apoyadas en conocimientos sólidos, acompañados por la aceptación social que derivará de la disponibilidad y accesibilidad de información fiable (Bertule et al., 2018).

La creciente demanda de agua subterránea y la ausencia de estrategias que permitan aminorar la fuerte presión que se ha ejercido sobre el acuífero Texcoco, Estado de México, ha generado consecuencias innegables y un deterioro progresivo que se agrava con el transcurso del tiempo. Es en este contexto, donde se pretende desarrollar un modelo numérico tridimensional de flujo subterráneo que permita integrar la información climática, geológica e hidrogeológica disponible y evaluar la situación actual y futura del acuífero, lo que sin duda sería una herramienta invaluable en el manejo sustentable del agua subterránea en el territorio.

## **1.2. Justificación científica y contextual**

El acuífero Texcoco es el principal recurso de agua de 12 municipios en la parte oriente del Valle de México, con una población a abastecer mayor a un millón y medio de habitantes (CONAGUA-UACH, 2009). Dicho acuífero presenta problemas relacionadas con la cantidad, calidad y gestión del agua subterránea por lo que el desarrollo económico de esta región depende fuertemente de la posibilidad de alcanzar un manejo sustentable del mismo (Escobar y Palacios, 2012). De acuerdo con los estudios realizados por la CONAGUA (2015), el acuífero es uno de los de mayor incremento de déficit a nivel nacional por año, situación que continúa agravándose a pesar de las restricciones impuestas y los esfuerzos realizados para frenar la sobreexplotación del agua subterránea.

A pesar de que en la zona de estudio se han realizados diversos estudios sobre el acuífero, hasta la fecha existen contradicciones e incertidumbres importantes en elementos clave como la estimación de la recarga, la definición de parámetros y las estimaciones del balance del acuífero, por lo que es necesario contar con un instrumento de gestión que permita integrar la información climática, geológica, hidrogeológica y edafológica disponible para el análisis presente y futuro de esta compleja situación (CTAEM, 2019). Por lo anterior, esta investigación está enfocada en el desarrollo de un modelo de flujo tridimensional del agua subterránea del acuífero Texcoco mediante la integración de información recopilada de diferentes fuentes, que sirva como base para lograr un correcto manejo de los recursos hídricos en el territorio.

## **1.3. Hipótesis de investigación**

Los problemas de sobreexplotación y uso inadecuado de los recursos hídricos subterráneos están afectando cada día a un mayor número de personas en el mundo. Para hacerles frente, en la actualidad contamos con un gran número de softwares y herramientas que facilitan el trabajo y la toma de decisiones más eficientes. Para enfrentar las problemáticas existentes en el acuífero de Texcoco, perteneciente a la cuenca del Valle de México, se plantea la siguiente hipótesis de investigación:

El desarrollo de un modelo tridimensional de flujo de aguas subterráneas en el acuífero Texcoco, Estado de México, permitirá conocer las condiciones actuales del Acuífero Texcoco y predecir su comportamiento bajo diferentes escenarios y estrategias de manejo.

#### **1.4. Objetivos de investigación**

##### **Objetivo general**

Simular el flujo tridimensional de las aguas subterráneas del acuífero Texcoco, Estado de México, mediante la aplicación del programa Visual MODFLOW Flex, para contribuir en la disminución del grado de explotación a que está sometido y la implementación de planes de manejo sustentable de los recursos hídricos en el territorio de forma eficaz y sostenible.

##### **Objetivos específicos**

- Recopilar, analizar y sintetizar la información disponible en diversas fuentes y a diferentes escalas sobre los elementos necesarios para la conceptualización y modelación numérica del sistema.
- Desarrollar un modelo conceptual hidrogeológico del acuífero Texcoco mediante la integración de la información climatológica, geológica e hidrogeológica disponible.
- Implementar un modelo numérico tridimensional de flujo de aguas subterráneas del acuífero Texcoco utilizando las herramientas del programa Visual MODFLOW Flex.
- Calibrar el modelo numérico de flujo tridimensional de aguas subterráneas del acuífero Texcoco utilizando las herramientas del programa Visual MODFLOW Flex.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Los recursos hídricos subterráneos

Los acuíferos desempeñan un papel de vital importancia en el crecimiento socioeconómico de México, gracias a las características fisicoquímicas de sus aguas que les permiten ser aprovechadas de diferentes maneras, y a su funcionamiento como embalses de almacenamiento y red de distribución, siendo posible extraer agua en cualquier época del año de prácticamente cualquier punto de la superficie del acuífero. Los acuíferos funcionan, además, como filtros purificadores, preservando la calidad del agua subterránea (CONAGUA, 2018b).

México, al igual que muchos otros países del mundo, enfrenta problemas relativos a la disponibilidad de agua y contaminación de corrientes y acuíferos, que se agravan por los patrones de consumo actuales en los diversos usos, los cuales generan grandes pérdidas. De seguir así, se incrementarán las zonas de escasez y las fuentes de abastecimiento tendrán serias restricciones para atender a las nuevas generaciones de usuarios (Arratia y Abdiel, 2019).

Según CONAGUA (2018b), en México el 36.4 % del agua concesionada para uso agrícola es de origen subterráneo al igual que el 58.4 % del agua para abastecimiento público. Estos niveles representan el grado de presión y sobreexplotación a que están expuestas las fuentes de abasto subterráneas del país. El problema de la sobreexplotación de los acuíferos en México es cada vez más grave; en 1975 eran 32 los acuíferos sobreexplotados, número que se elevó a 36 en 1981, a 80 en 1985, luego a 97 en 2001, 102 en 2003, posteriormente en 2017 a 105 y en la actualidad de los 653 acuíferos delimitados en el país, 157 se encuentran sobreexplotados (CONAGUA, 2020, Escobar y Palacios, 2012; Hernández et al., 2019; Martínez et al., 2019). A menos que se encuentre la forma de llevar a cabo el manejo sustentable y recuperar los niveles de aguas subterráneas, en un futuro próximo se agravarán los problemas de déficit de este recurso.

## **2.2. Manejo sustentable de acuíferos**

El concepto de desarrollo sustentable implica “satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer el derecho de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades”. Particularmente para el agua, esto implica que se utilice el recurso en la actualidad de modo tal que pueda ser aprovechado con buena calidad y en cantidad suficiente por las siguientes generaciones. Para lograrlo, es necesaria la solidaridad y cooperación de todos los actores que están involucrados, con distinto grado de participación y de responsabilidad, en el manejo sustentable del agua (CMMAD, 1987).

En el 2015, los Miembros de las Naciones Unidas adoptaron diecisiete Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) que se extenderán hasta el 2030 y, el sexto objetivo plantea el garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos (ONU, 2019). Este objetivo trata de forma específica los temas relacionados con el agua, destacando el papel fundamental que representa la protección en cantidad y calidad de los recursos hídricos, así como su manejo sustentable (WWAP/ONU, 2018). Considerando que una gran parte de la población mundial se abastece exclusivamente de fuentes de aguas subterráneas es de gran importancia su correcto aprovechamiento y manejo.

El agua es uno de los componentes fundamentales para el desarrollo sostenible y para la viabilidad los sistemas ecológicos que soportan la producción actual (ONU, 2018). Los recursos hídricos constituyen los cimientos sobre los que se asienta el tan reclamado y publicitado desarrollo sostenible, al mismo tiempo que los ecosistemas y sustento humano dependen de un uso eficiente y racional de este líquido vital que cada vez escasea más. Por lo tanto, no sólo es necesario preservar el agua sino también hacer una distribución más equitativa, preservar su calidad y contribuir a la gestión y el manejo sustentable de este recurso.

Una parte de los recursos hídricos está representada por las aguas subterráneas y una gestión eficaz y sostenible de estas viene dada por un correcto uso y manejo de ellas. Según UNESCO (2015), el manejo sustentable de las aguas subterráneas se basa en los enfoques holísticos, multidisciplinarios y ambientalmente sólidos, así como en estudios que incluyen la cantidad,

calidad de las aguas subterráneas y las relaciones entre aguas subterráneas, aguas superficiales, y entre ecosistemas dependientes.

En México la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es la responsable de la administración y preservación de las aguas del país con el fin de garantizar el uso sustentable del recurso (González et al., 2018). Se organiza en tres áreas operativas: gestión de agua, organismos de cuenca y asistencia técnica. Sus objetivos son: promover una gestión integrada y sustentable del agua en cuencas y acuíferos; mejorar el desarrollo técnico administrativo y financiero del sector hidráulico; consolidar la participación de los usuarios y la sociedad organizada en el manejo del agua y promover la cultura de su buen uso; además, de prevenir los riesgos derivados de fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos y atender sus efectos; evaluar los efectos del cambio en el ciclo hidrológico; y crear una cultura contributiva y de cumplimiento a la Ley de Aguas Nacionales en materia administrativa (CONAGUA, 2014a).

Las investigaciones relacionadas con el manejo sustentable de los recursos hídricos subterráneos en diferentes escenarios hidrogeológicos y en ciudades densamente pobladas es un tema de gran actualidad, ejemplo, en México, Morales y Rodríguez, (2020) estimaron el consumo de agua de una de las regiones más pobladas y de mayor actividad económica de México, la cuenca del Valle de México obteniendo como resultado que dos quintas partes del agua no renovable consumida en la cuenca, es agua subterránea extraída sobreexplotando los acuíferos. Esperanza (2015), realizó una investigación sobre los enfoques de conservación del acuífero Texcoco que le permitan seguir utilizando el agua bajo los lineamientos de la política pública del Estado Mexicano. Aguilar et al. (2011), desarrollaron una investigación que llevó por título: La gestión del agua en la Región Texcoco, Estado de México, en la que analizaron la gestión del agua para el uso público urbano en los municipios de la Región Texcoco. En esta describen los actores e instituciones involucradas, así como las relaciones que se establecen entre estos.

### **2.3. Modelación matemática de acuíferos**

En los últimos años se observa a nivel mundial una tendencia creciente al estudio del aprovechamiento de los recursos hídricos, con énfasis especial en los problemas relativos al

agua subterránea. Si a principios del siglo pasado era posible resolver los problemas de la explotación de los acuíferos por métodos relativamente aproximados y sin una base científica rigurosa, la necesidad de poder determinar con la mayor exactitud posible los recursos de agua subterránea y la forma óptima de su explotación, unido al carácter complejo de los factores que inciden en su ocurrencia y aprovechamiento, implica necesariamente la utilización de métodos más rigurosos y de técnicas más modernas (Defáz y Sixto, 2019; Liu et al., 2018a).

Las técnicas de modelación numérica de aguas subterráneas son las más utilizadas a nivel internacional para gestionar los recursos hídricos (Aguilera y Ramos, 2019; Rahman et al., 2018). En términos generales, un modelo es una representación simplificada de la apariencia o funcionamiento de un sistema u objeto real (Konikow y Bredehoeft, 1992). De acuerdo con Anderson et al. (2015), los modelos de agua subterránea pueden ser divididos en modelos físicos y modelos matemáticos.

Los modelos matemáticos describen las leyes físicas y relaciones mediante expresiones matemáticas, funciones, ecuaciones lineales o diferenciales (Chen et al., 2018). Éstos se pueden clasificar en modelos dirigidos por datos o modelos de caja negra y también en modelos basados en procesos o modelos basados en la física (Peherstorfer y Willcox, 2016). En general, los modelos matemáticos pueden ser resueltos por métodos analíticos, como la fórmula de Theis para el flujo en régimen no estacionario (Raghavan y Chen, 2019; Sethi et al., 2019), o por métodos numéricos, si las ecuaciones resultantes no admiten soluciones analíticas (Liu et al., 2018b).

Un modelo conceptual hidrogeológico es el conjunto de ideas, leyes, relaciones y conceptos que establece el hidrogeólogo sobre un sistema acuífero que permite la representación de un fenómeno físico y constituye la base de cualquier tipo de modelo numérico en un sistema de agua subterránea (Enemark et al., 2019; Hamad et al., 2018). El modelo de programa de computadora es el que da solución a las ecuaciones del agua subterránea y cuyo propósito general es que pueda ser usado para simular una variedad de sistemas específicos debido a los diversos datos de entrada. El modelador trata de incorporar lo que considera que son los aspectos más importantes del modelo conceptual en el modelo, a fin de que este provea

información útil acerca del sistema en estudio (Carvalho y Almeida, 2018; Reilly y Harbaugh, 2004; Tahershamsi et al., 2018).

De acuerdo con Ramos et al. (2013), los modelos matemáticos para la simulación del flujo del agua subterránea representan la operación de un sistema real mediante ecuaciones matemáticas resueltas por medio de modelos o esquemas numéricos (Reilly y Harbaugh, 2004). La mayoría de los problemas físicos reales no admiten soluciones analíticas, ni con las simplificaciones habituales, tanto conceptuales como funcionales y, además, en muchos casos no se cuenta con los datos necesarios para asegurar que el problema resuelto represente “exactamente” la realidad (Anderson et al., 2015).

La modelación matemática de aguas subterráneas resulta indispensable para el estudio y solución de problemas de sobreexplotación, contaminación y gestión de acuíferos (Antonio, 2017; Fernández, 2017). Dado que en muchas aplicaciones prácticas las ecuaciones (diferenciales) que gobiernan el flujo del agua subterránea no tienen una solución matemática analítica, es necesario utilizar métodos numéricos aproximados, siendo los más utilizados: el método de las diferencias finitas y el método de los elementos finitos (Alves, 2018; Anderson et al., 2015; Ramos et al., 2016; Singh, 2014).

El Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS por sus siglas en inglés, en la década de los 80’ desarrolló el programa MODFLOW (*Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*) para simular el flujo tridimensional de aguas subterráneas. El código fuente de MODFLOW es de dominio público, por lo que han sido compiladas numerosas versiones para computadoras personales por diversos editores de programas (Ramos et al., 2016). La compañía canadiense, *Waterloo Hydrogeologic*, ha compilado una versión bajo el nombre Visual MODFLOW Flex y que por sus grandes capacidades es utilizada en el desarrollo de la presente investigación.

En la zona de estudios se han realizado con anterioridad dos investigaciones de modelación numérica de flujo subterráneo. La primera en 2006 llevada a cabo por la CONAGUA, con el objetivo principal de actualizar la información para el acuífero Texcoco y contar con un modelo hidrogeológico de la zona (CONAGUA, 2006). La segunda investigación de modelación para la zona fue desarrollada en el año 2019 por la Universidad Nacional

Autónoma de México (UNAM) (Suárez, 2019). El objetivo principal de esta fue desarrollar una herramienta para plantear y evaluar programas de gestión hídrica que ayuden a disminuir los abatimientos del nivel estático y la condición de sobreexplotación actual a que está sometido el acuífero. Debido a diversas contradicciones e incertidumbres importantes en elementos clave como la estimación de la recarga, la definición de parámetros, régimen de flujo y selección de unidades hidroestratigráfica se pretende integrar toda la información disponible en un nuevo modelo numérico que sea capaz de representar lo más fiel posible la realidad existente actualmente en el territorio.

## **CAPÍTULO III. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO**

### **3.1. Localización y características generales**

El acuífero Texcoco, definido con la clave 1507 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se ubica en la porción centro-oriental del Estado de México; geográficamente se localiza entre los paralelos 19° 18' y 19° 38' de latitud norte y los meridianos 98° 39' y 99° 03' de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 934 km<sup>2</sup>, una elevación máxima de 2940 msnm y una altitud promedio de 2240 msnm (CONAGUA, 2018a).

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica No. 26, Pánuco, Subregión Hidrológica Valle de México, cuenca del Río Moctezuma. El sistema hidrográfico del acuífero está integrado principalmente de escurrimientos efímeros e intermitentes de carácter torrencial, con avenidas de corta duración y arroyos secos durante el estiaje (CONAGUA, 2018a).

La poligonal que lo delimita se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 3.1 y la Figura 3.1. Limita al norte con el acuífero 1508 Cuautitlán-Pachuca, perteneciente al Estado de México; al este con el acuífero 2902 Soltepec, perteneciente al estado de Tlaxcala; al sur y sureste con el acuífero 1506 Chalco-Amecameca, perteneciente al Estado de México y al oeste con el acuífero 0901 Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Figura 3.2).

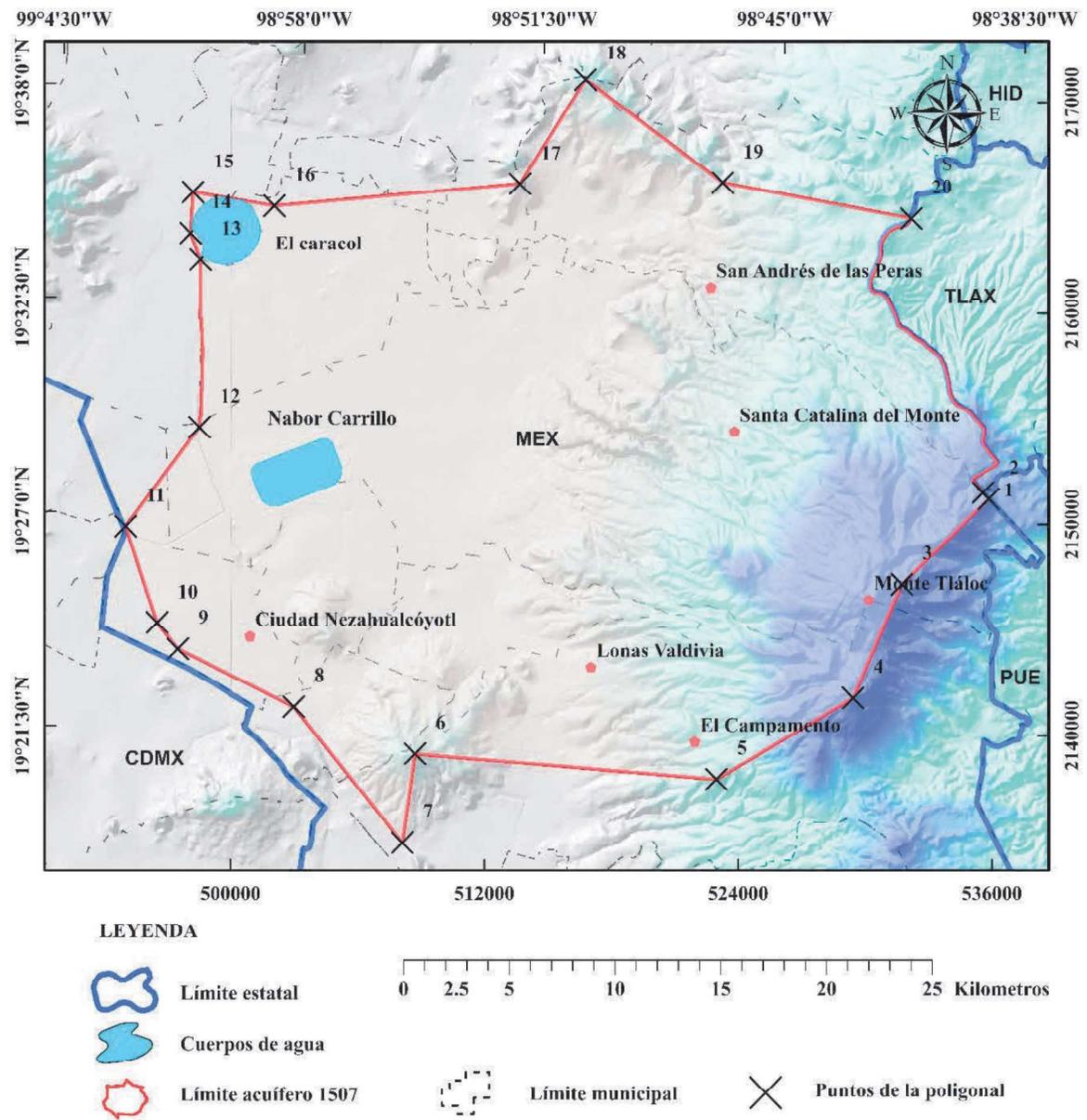


Figura 3.1. Puntos de la poligonal simplificada del acuífero Texcoco.

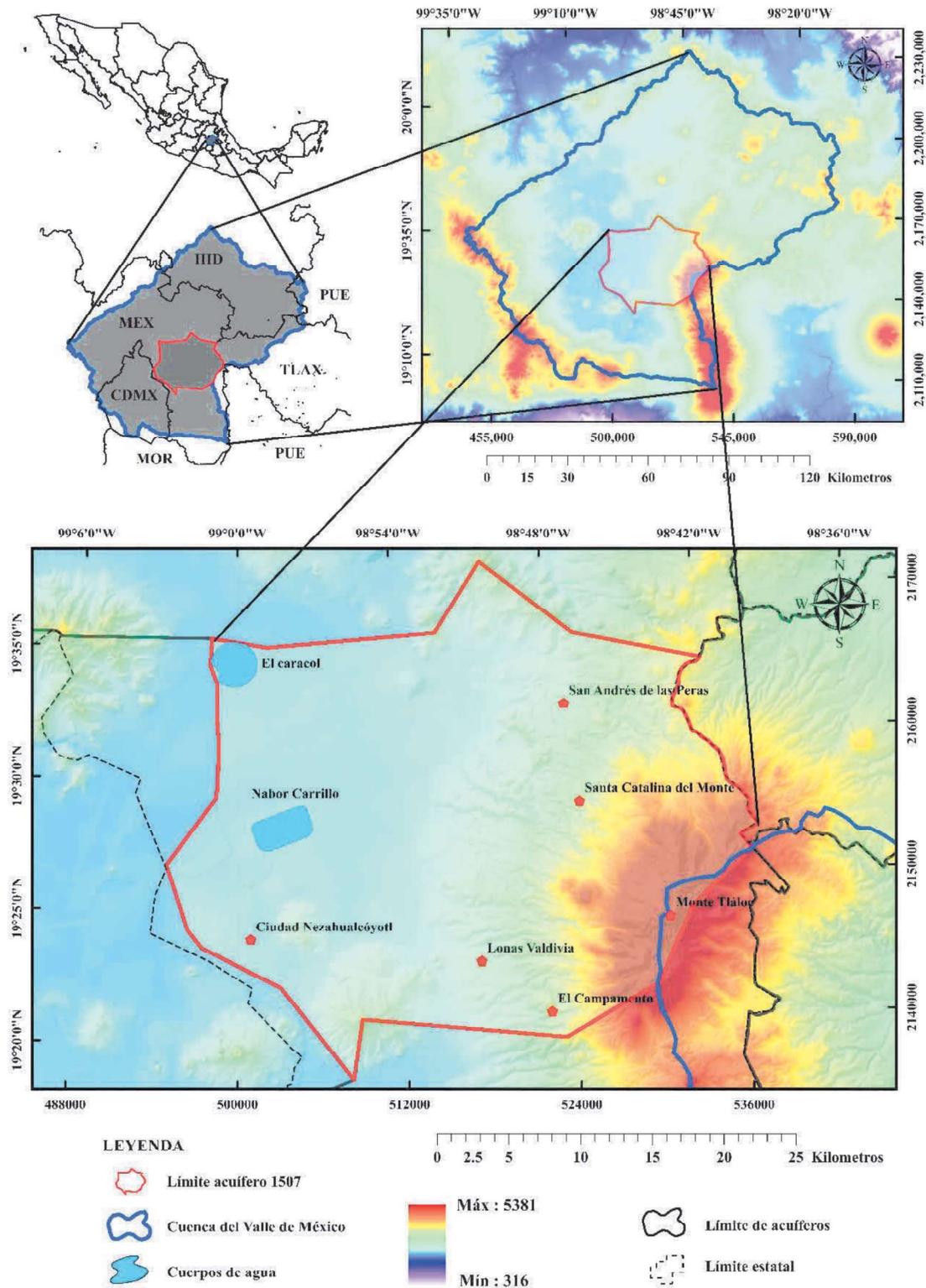


Figura 3.2. Localización del acuífero Texcoco. Fuente: Con base en CONAGUA (2018<sup>a</sup>).

Tabla 3.1. Coordenadas de la poligonal del acuífero Texcoco.

VÉRTICES	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRAD.	MIN.	SEG.	GRAD.	MIN.	SEG.	
1	98	39	39.3	19	27	27.6	Vértices del 1 al 2 por el límite estatal
2	98	39	30.5	19	27	18.0	
3	98	41	51.6	19	25	6.9	
4	98	43	11.0	19	22	11.6	
5	98	46	52.6	19	20	6.7	
6	98	55	1.0	19	20	46.4	
7	98	55	21.5	19	18	29.8	
8	98	58	17.4	19	21	59.0	
9	99	1	25.4	19	23	28.2	
10	99	1	59.0	19	24	8.4	
11	99	2	50.0	19	26	37.3	
12	99	0	50.2	19	29	9.4	Vértices del 12 al 13 por el límite municipal
13	99	0	48.6	19	33	27.9	
14	99	1	4.5	19	34	8.8	
15	99	1	0.7	19	35	11.6	
16	98	58	48.8	19	34	50.6	Vértices del 20 al 1 por el límite estatal
17	98	52	9.8	19	35	24.2	
18	98	50	23.5	19	38	4.7	
19	98	46	41.1	19	35	25.6	
20	98	41	35.1	19	34	30.4	
1	98	39	39.3	19	27	27.6	

Geopolíticamente, la región del acuífero comprende totalmente los municipios Chicoloapan, Chimalhuacán, Chiconcuac, Papalotla y Texcoco; casi la totalidad de Atenco, Chiautla, Ixtapaluca, Nezahualcóyotl, La Paz y Tepetlaoxtoc; así como pequeñas porciones de los municipios Acolman, Ecatepec de Morelos y Tezoyuca.

### 3.2. Características físicas

#### 3.2.1. Rasgos topográficos

La presencia de las sierras es uno de los aspectos físicos que caracterizan y limitan a la cuenca de México; sin embargo, en su interior el relieve es básicamente suave, dominando las llanuras lacustres con altitudes promedio de 2,240 msnm, que sólo se ven interrumpidas por algunas elevaciones de relativa altura entre las que destacan las sierras de Guadalupe y Santa Catarina localizadas al norte y suroriente de la Ciudad de México respectivamente. En

general, es posible identificar en la superficie del acuífero dos elementos geomorfológicos principales: las zonas altas que bordean la planicie, que están constituidas por sierras, cerros, laderas y lomeríos, en la porción oriental, y las zonas planas que corresponden a una altiplanicie que consta de depresiones lacustres en proceso de desecación y pequeñas elevaciones topográficas aisladas (Figura 3.3).

La zona de estudio se caracteriza por presentar en su mayor parte, una planicie aluvial correspondiente a depresiones lacustres circundadas al norte, sur y este por elevaciones que funcionan como barreras naturales. Al este se encuentra la elevación más importante dentro del área de estudio: el Monte Tláloc, el cual forma parte de la Sierra Nevada y registra una altitud de 4,125 msnm. Al sur del Monte Tláloc se encuentra el volcán Telapón, que alcanza una altitud de 4,060 msnm. El límite sur se encuentra el volcán La Caldera con una elevación de 2,747 msnm. Al oeste y al noroeste no se encuentran elevaciones que delimitan el acuífero. En la porción norte se encuentran los cerros Xoconoch con una altitud de 2746 msnm, circundado por el Cerro Coapilco, Cero Tezontlale y el Cerro Teponaxtle.

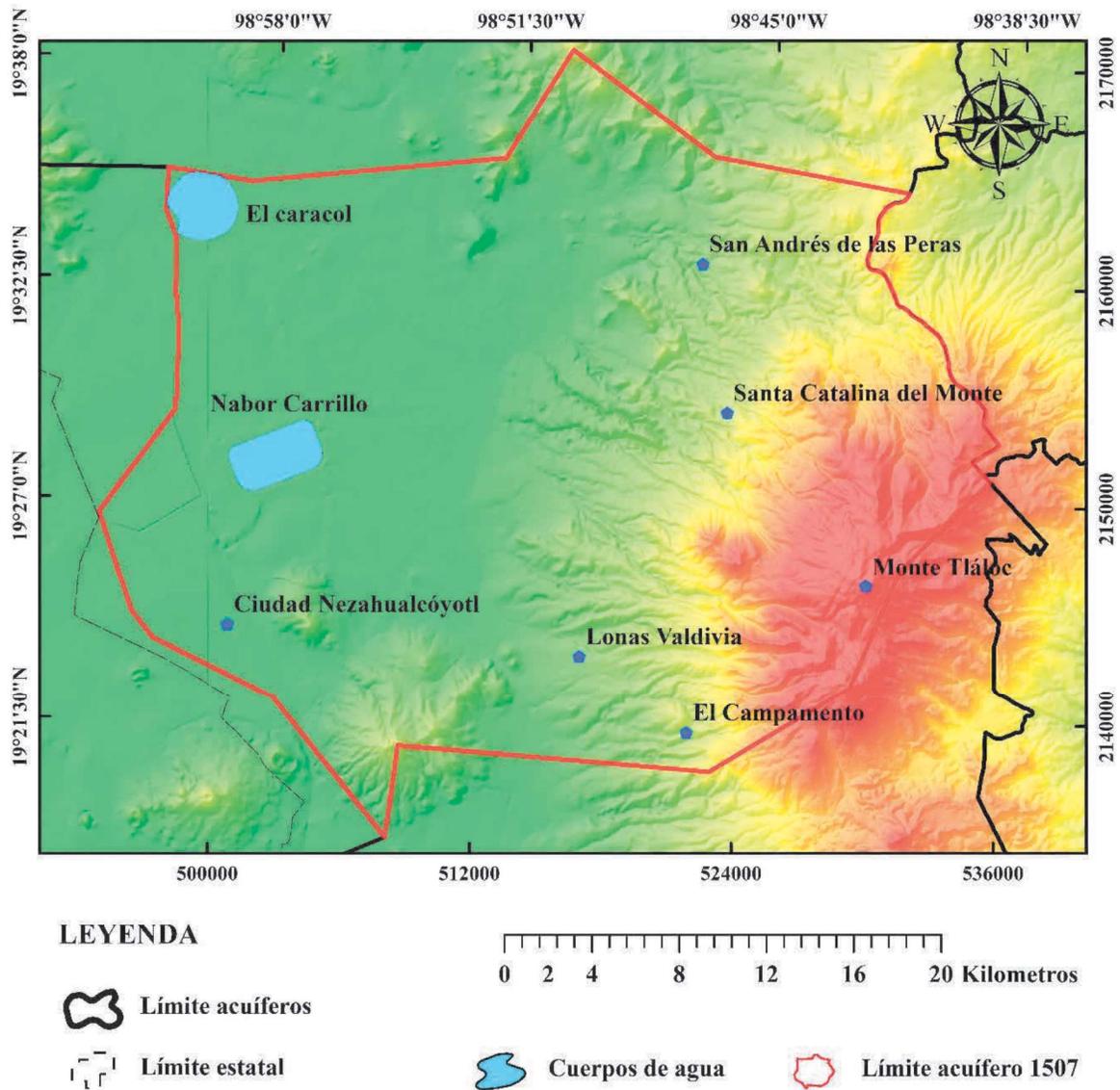


Figura 3.3. Mapa hipsográfico del acuífero Texcoco. Fuente: IFOMEGEM, 2013.

### 3.2.2. Edafología

La clasificación de suelo realizada por INEGI (2014) indica que el suelo que predomina en el área de estudio es el Phaeozem, el cual se distribuye a través de una franja con dirección norte-sur y se caracteriza por ser suelos oscuros y ricos en materia orgánica, por lo que son muy utilizados en agricultura de temporal; sin embargo, las sequías periódicas y la erosión eólica e hídrica son sus principales limitantes (Figura 3.4).

En el centro de la poligonal del acuífero, hacia el centro-norte se observan vertisoles; estos suelos se pueden encontrar en los lechos lacustres, en las riberas de los ríos o en sitios con inundaciones periódicas.

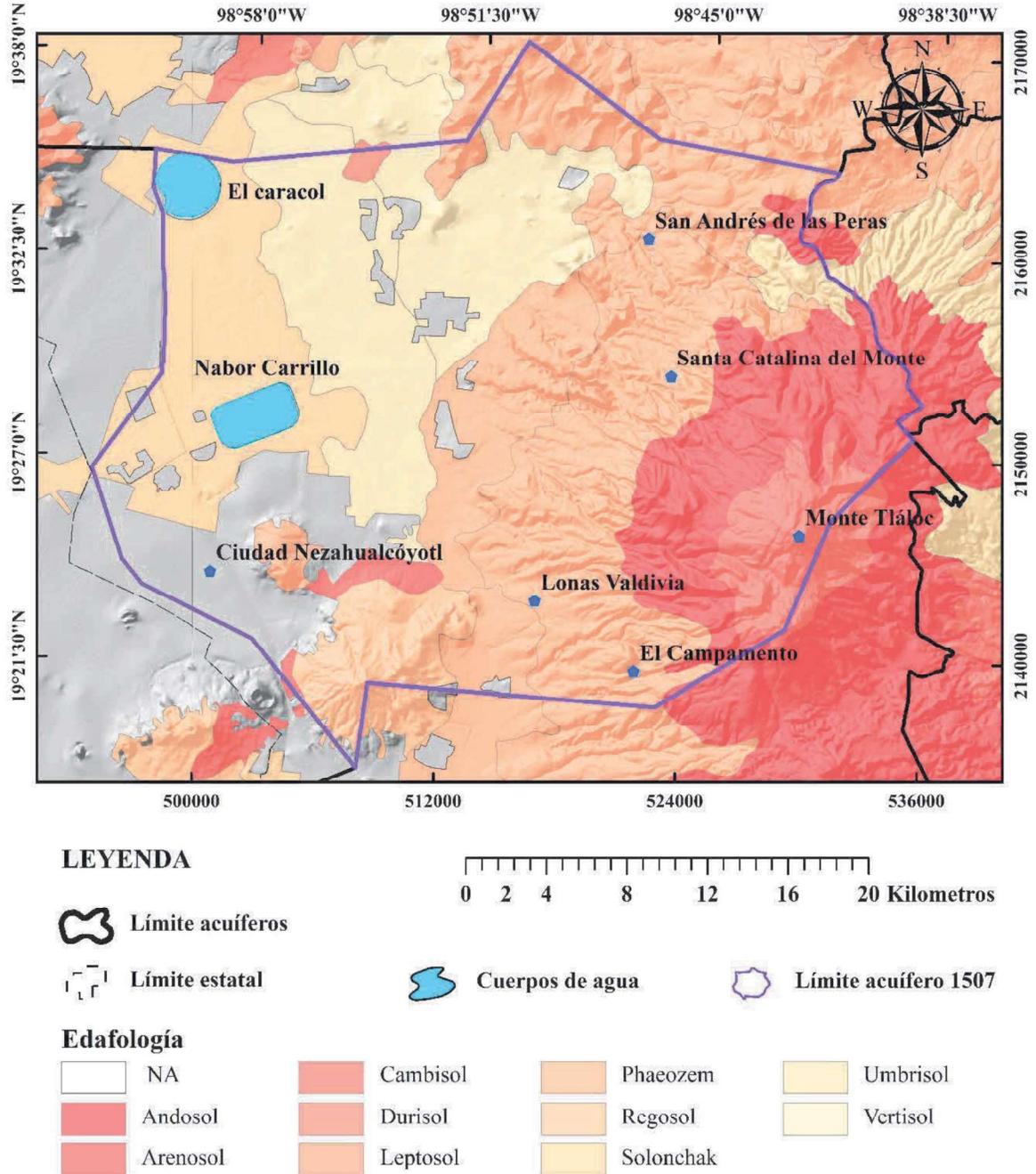


Figura 3.4. Mapa edafológico del acuífero Texcoco. Fuente: INEGI, 2014.

Se caracterizan por su alto contenido de arcillas que se expanden con la humedad y se contraen con la sequía, lo que puede ocasionar grietas en esta última temporada. Esta

propiedad hace que, aunque son muy fértiles, también sean difíciles de trabajar debido a su dureza durante el estiaje y a que son muy pegajosos en las lluvias (IUSS, 2007).

En la zona lacustre se registran Solonchak; que son suelos que se desarrollan principalmente en zonas permanente o estacionalmente inundadas. La vegetación que comúnmente crece en estos suelos es herbácea con frecuente predominio de plantas halófilas debido a que son suelos con un alto contenido en sales solubles.

Hacia el poniente, conforme se asciende topográficamente con dirección al monte Tláloc, se presentan andosoles, los cuales suelen estar asociados a actividad volcánica, tienen un alto potencial para la producción agrícola. En la cima del monte Tláloc se registra suelo de tipo cambisol, para estos suelos se recomienda que, en zonas, de pendientes pronunciadas se conserven para uso forestal.

### **3.2.3. Uso de suelo y cobertura vegetal**

En el área de estudio está caracterizada con diferentes usos de suelo entre los que se encuentra el uso de suelo agrícola, urbano, pastizal, matorral, bosque, pradera y otros usos como la vegetación secundaria (Figura 3.5). Destaca por su extensión territorial el uso agrícola tanto de temporal como de riego, los cuales ocupan gran proporción de la planicie de Texcoco, seguido de los usos de bosque en los que se incluyen diversos tipos como el bosque de pino, oyamel y de encino, localizados principalmente en la zona suroeste del límite del acuífero. Resalta de igual forma las zonas urbanas y las áreas sin vegetación localizadas principalmente en la zona del ex lago de Texcoco. En el caso de la vegetación secundaria, esta se ubica principalmente en el piedemonte de la zona este.

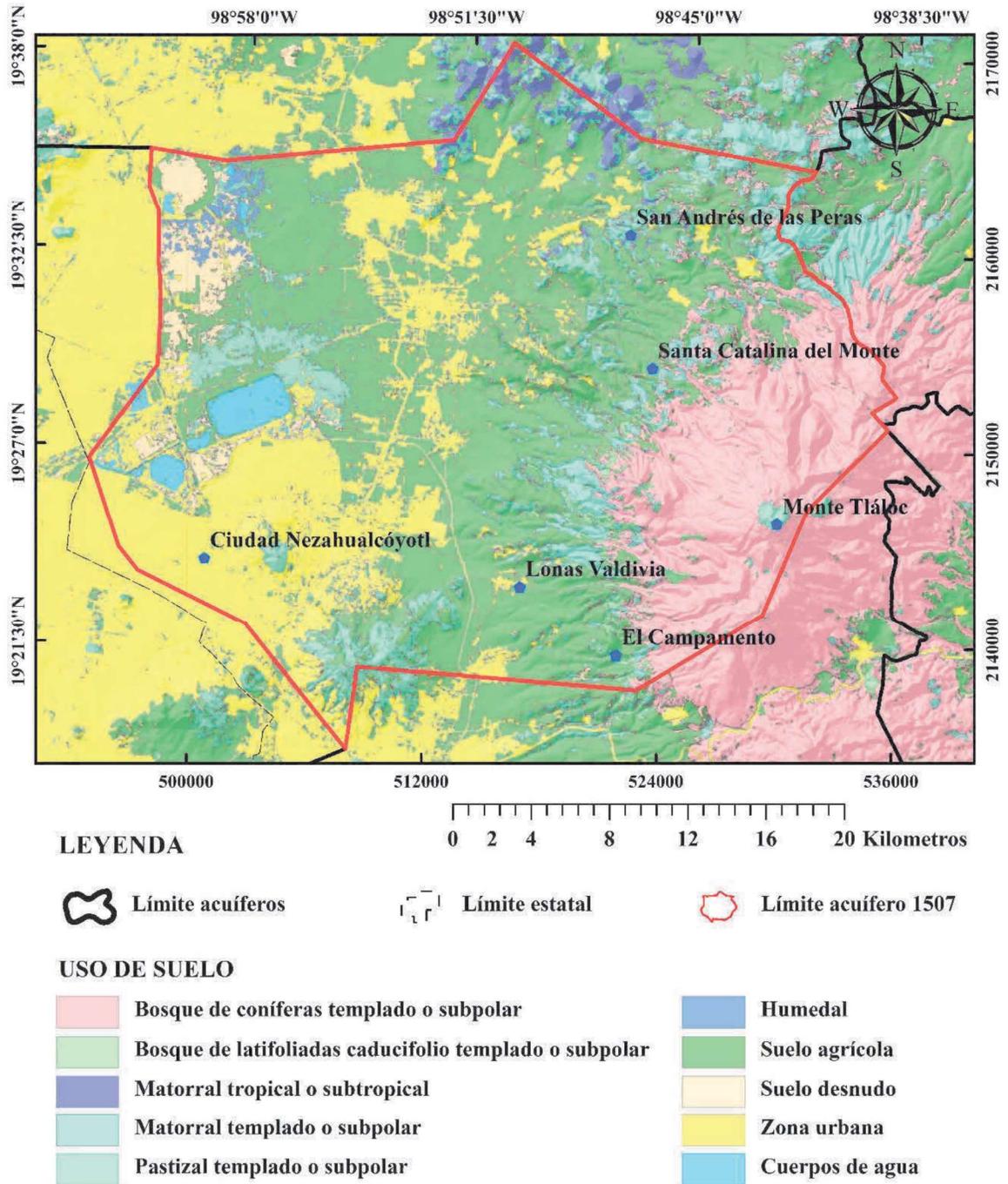


Figura 3.5. Mapa de uso de suelos del acuífero Texcoco. Fuente: INEGI, 2017.

### 3.2.4. Clima

De acuerdo con la modificación de Enriqueta García a la clasificación de Köppen (García, 1998), los climas presentes en el área de estudio se clasifican en: **Cb'(w2)**: Clima semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C. Precipitación

en el mes más seco menor de 40 mm, con lluvias de verano. **C(w0)**: Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm, con lluvias en verano). **C(w1)**: Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm, con lluvias de verano. **C(w2)**: Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm, y lluvias de verano. **Y BS1kw**: Semiárido, templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C. con lluvias en verano (Figura 3.6).

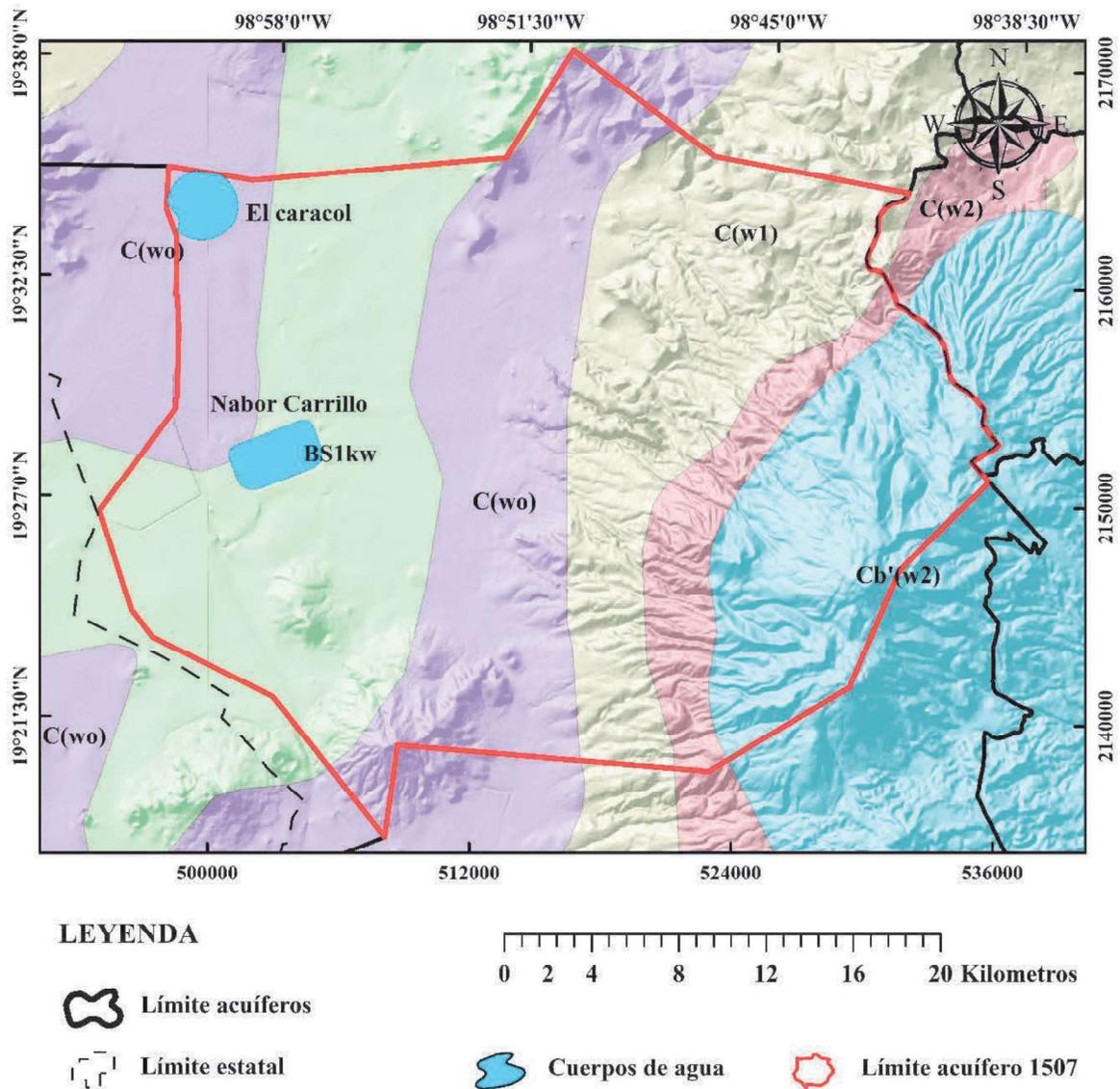


Figura 3.6. Mapa de climas del acuífero Texcoco. Fuente: IFOMEGEM, 2014.

### **3.2.5. Población y desarrollo socioeconómico**

De acuerdo con los resultados del Censo de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el año 2010, la población asentada dentro de los límites del acuífero Texcoco, era poco mayor a los 2.4 millones de habitantes, distribuidos en 46 localidades urbanas que en conjunto albergan 2 346 652 habitantes y 148 localidades rurales cuya población en conjunto suma 53 389 habitantes.

Las localidades más pobladas son Ciudad Nezahualcóyotl con 1 101 585 habitantes, San Francisco Acuautla con 27 960 habitantes, La Magdalena Atlicpan con 26 429, San Miguel Coatlinchán con 22 619 habitantes, Chinconcuac de Juárez con 21 738 habitantes, San Salvador Atenco con 17 124 habitantes, Santa María Tulantongo con 15 584 habitantes, San Sebastián Chimalpa con 12 951 habitantes, Lomas de San Sebastián con 12 372 habitantes, Santiago Cuautlalpan con 12 336 habitantes y Profesor Carlos Hank González con 10 416 habitantes.

En la Tabla 3.2 se presenta la distribución de la población que habita en los municipios comprendidos dentro de los límites del área en estudio, de acuerdo con la información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para el conteo de la población del año 2005, El Censo de Población y Vivienda del año 2010 y el Conteo de población del año 2015, para mostrar la evolución y distribución de la población a través del tiempo, caracterizada por un importante incremento, debido a que estos municipios del Estado de México se localizan en la zona conurbada de la Ciudad de México, con un acelerado crecimiento.

El desarrollo histórico y económico del Valle de México ha ejercido un papel trascendental en el país, debido a su alto desarrollo industrial y poblacional, creando al mismo tiempo una demanda significativa de agua en diversas zonas de la Cuenca de 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.

Aproximadamente el 24 % de la población se ocupa en el comercio, el 20 % se dedica a alguna actividad dentro de la industria manufacturera, el 7 % se dedica a la industria de la

construcción. El 6% se ocupa en actividades propias del transporte, correos y almacenamiento, el 1.3 % se dedica al sector agrícola, forestal y ganadero. La demás población se dedica a los servicios, educativos, profesionales, de apoyo a negocios, de salud y de asistencia social, de esparcimiento y culturales, hoteles y restaurantes, financieros y de seguros, inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles y actividades del gobierno. El principal uso del agua subterránea del acuífero Texcoco, es el público urbano, ya que el 70% del volumen total que se extrae del acuífero se destina para este uso (INEGI, 2015).

**Tabla 3.2. Número de habitantes comprendidos entre los límites del acuífero Texcoco. Estado de México. Fuente: INEGI, 2015.**

Municipios	Conteo 2005	Censo 2010	Conteo 2015
Nezahualcóyotl	1 140 528	1 110 565	1 039 867
Chimalhuacán	525 389	614 453	679 811
Texcoco	209 308	235 151	240 749
Chicoloapan	170 035	175 053	204 107
La Paz	232 546	253 845	293 725
Ixtapaluca	429 033	467 361	495 563
Atenco	42 739	56 243	62 392
Tepelaoxtoc	25 523	27 944	30 680
Chiconcuac	19 656	22 819	25 159
Chiautla	22 664	26 191	29 159
Papalota	3 766	4 147	3 963
<b>Total</b>	<b>2 821 187</b>	<b>2 993 772</b>	<b>3 105 175</b>

### 3.2.6. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Texcoco pertenece al Organismo de Cuenca XIII “Aguas del Valle de México” y es jurisdicción territorial del Estado de México. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos. El primero comprende la mayor parte de la superficie y decreta solo la extracción para usos doméstico y pertenece al Consejo de Cuenca Valle de México, instalado el 16 de agosto de 1995. El segundo decreto se establece sobre una pequeña superficie en la zona suroriental que sólo permite extracciones para usos doméstico y abrevadero que se realicen por medios manuales y pertenece al Consejo de Cuenca Río Balsas, instalado el 26 de marzo de 1999 (CONAGUA, 2018a).

### 3.3. Geología

La geología del acuífero está íntimamente ligada al desarrollo y evolución de la Cuenca del Valle de México, las rocas que la constituyen deben su origen a procesos volcánicos y

tectónicos desarrollados desde el Eoceno (Mooser, 1961; Mooser, 1996, Mooser, 2018). Durante este período se inició un conjunto de procesos eminentemente volcánicos, evidenciados por la presencia de importantes espesores de lava, toba y brecha.

Mientras que durante el Mioceno temprano predominaron las erupciones de andesita y dacita, con un espesor promedio de 600 a 700 m, esta actividad magmática y tectónica generó rocas volcánicas y un extenso fracturamiento con una orientación W-E. Las grandes depresiones formadas fueron rellenas por material clástico, al oriente, hacia el antiguo Lago de Texcoco, donde existen depósitos aluviales constituidos por depósitos clásticos plio-cuaternarios subyacidos por material aluvial y lahares retrabajados (CONAGUA, 2015).

Estas depresiones (fosas) fueron cubiertas tanto por materiales producto de la erosión como por rocas provenientes de la actividad volcánica contemporánea; así en la parte inferior de las sierras mayores se encuentran extensos abanicos volcánicos, mientras que sierras de menor elevación, como la Sierra de Guadalupe, se caracterizan por presentar abanicos aluviales menores. El origen de los depósitos lacustres está relacionado con la obstrucción definitiva del drenaje de la Cuenca de México, causado por la intensa actividad volcánica que edificó la Sierra de Chichinautzin (CONAGUA, 2014a).

Hacia las porciones limítrofes con las Sierras altas o piedemonte se encuentra materiales clásticos interdigitados con lavas, tobas, cenizas y depósitos epiclásticos y piroclásticos de flujo. En el Cuaternario continúa el vulcanismo de la etapa interior, sobresaliendo la andesita y basalto reconocidos en los cerros de Chimalhuacán, Gordo y El Pino. Asimismo, las sierras mayores con grandes volcanes, como los de la Sierra Nevada, alcanzaron su máximo desarrollo, formándose extensos abanicos volcánicos (CONAGUA, 2006).

De esta forma, tal como se muestra en la Figura 3.7 la geología superficial del acuífero Texcoco, está constituida por rocas sedimentarias, volcánicas y en menor proporción por rocas intrusivas, cuyo registro estratigráfico comprende del Cretácico hasta el Reciente (SGM, 2002; Suárez, 2019).

De acuerdo con el análisis de la información proveniente de Fries, Jr., (1960), Vázquez y Jaimes (1989), Mooser et al. (1996), entre otros; y su integración con los resultados aportados

por las perforaciones exploratorias realizadas por PEMEX en 1986 (en: Sánchez-Díaz, 1989), la secuencia estratigráfica establecida en la Cuenca de México, como para el Acuífero de Texcoco se señala en la Tabla 3.3; en tanto, en las Figuras 3.8 y 3.9 se muestran las secciones que Suárez (2019) presenta en su investigación.

Además, en la Figura 3.10 se puede ver la columna estratigráfica del pozo PT-1 que de acuerdo con SHCP, 1969 está constituida por: capas de arcillas, limos y arenas, de 0 a 180 m; 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 (Lojero-Ochoa, 2014) .

Con base en el análisis de los diferentes estudios geológicos, hidrogeológicos, geofísicos y piezometría del área de estudio y tomando como referencia los mapas geológicos de Suarez, 2019 y CONAGUA, 2018 se actualizó el mapa geológico del acuífero Texcoco que se muestra en la Figura 3.7. Con base en el mapa geológico desarrollado se definieron las secciones hidrogeológicas de las Figuras 3.8 y 3.9 mediante la selección de seis unidades hidroestratigráficas cuya geología se ajustó de acuerdo con la presentada en el mapa geológico.

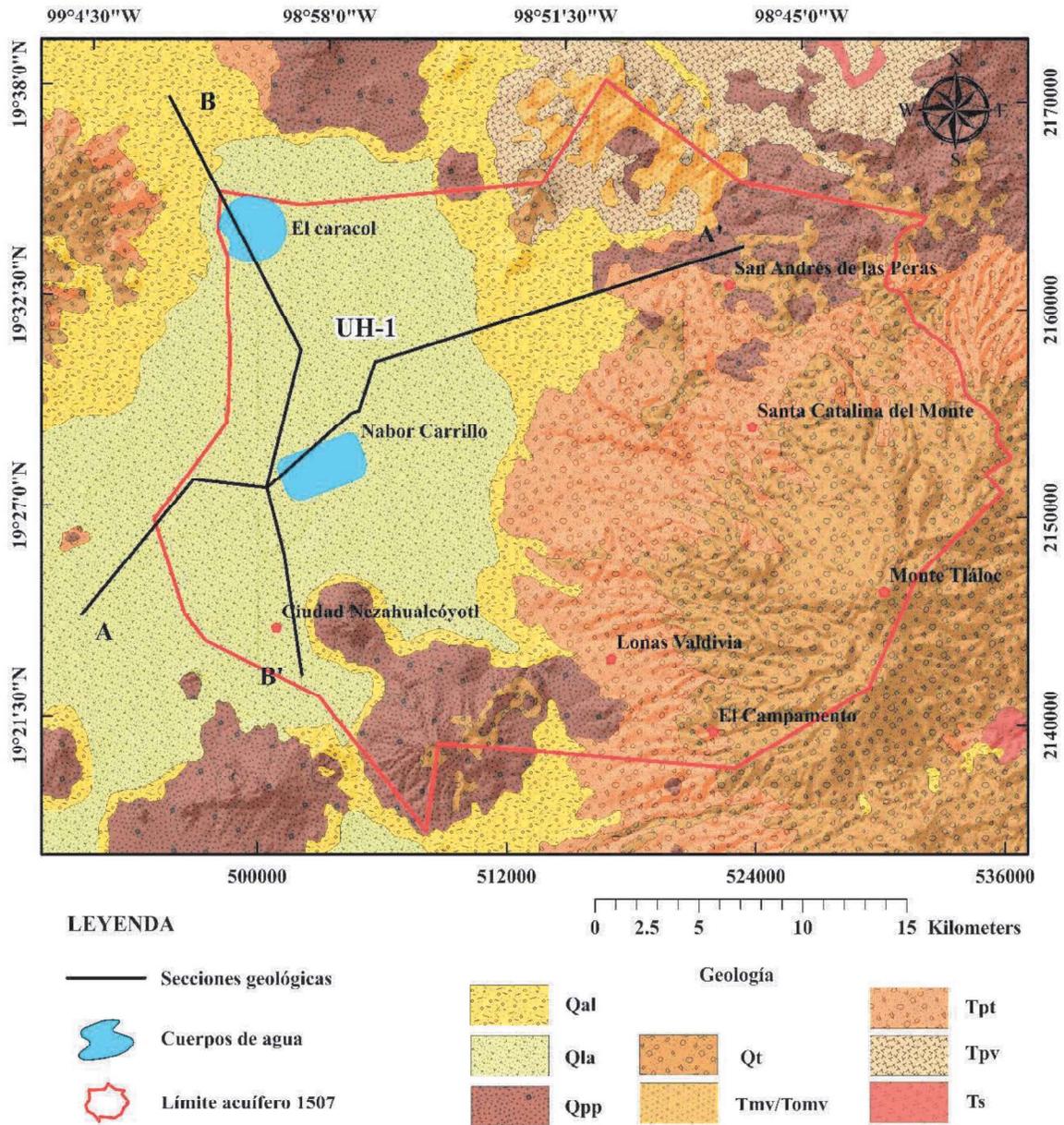


Figura 3.7. Mapa geológico del acuífero Texcoco.

**Sección A - A' (Suroeste - Noreste)**

Esta sección se ubica del extremo Suroeste al Noreste de la zona de estudio, se extiende aproximadamente 38.8 km y atraviesa en su mayor parte los depósitos lacustres y aluviales del valle hasta llegar a las rocas más antiguas de la zona, la formación Tarango y depósitos volcánicos del Plioceno Temprano. La sección se extiende a través del lago Labor Carrillo y sobre el pueblo Tulantongo.

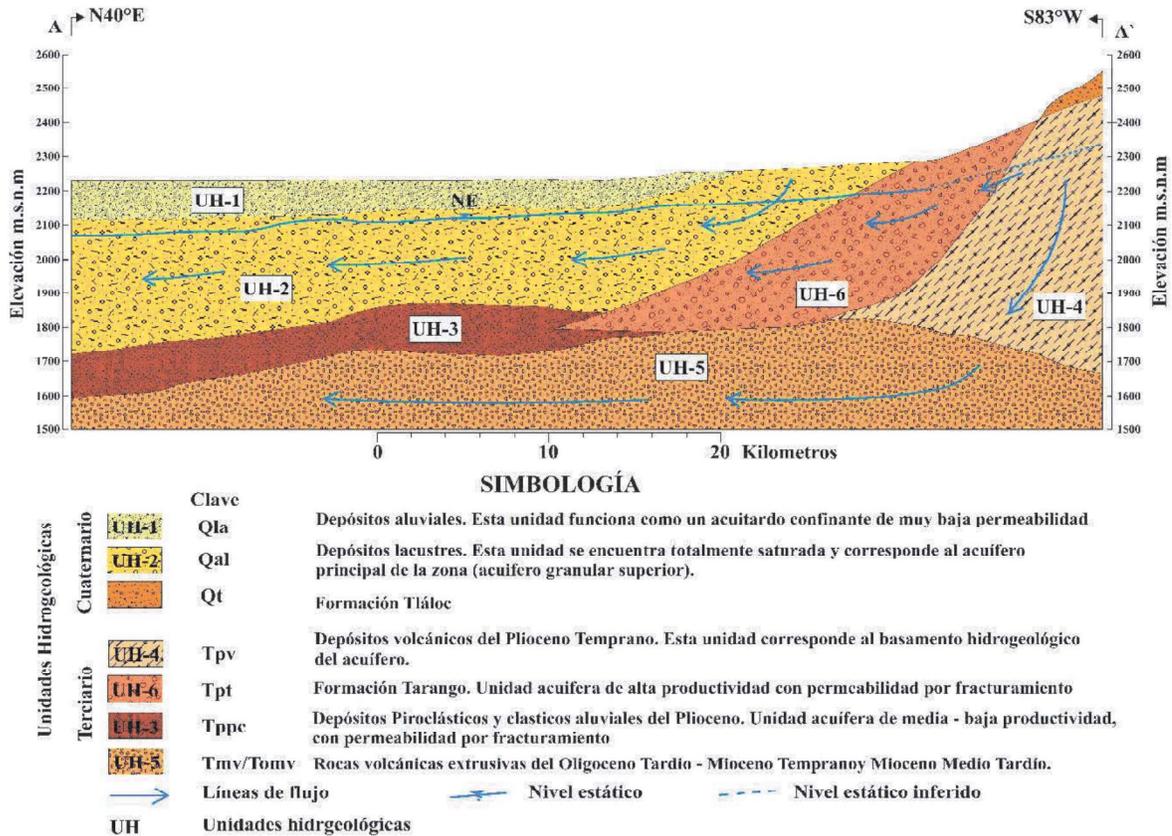


Figura 3.8. Sección hidrogeológica A-A' del acuífero Texcoco, Tomada de Suárez, 2019.

### Sección B - B' (Norte - Sur)

Esta sección se extiende aproximadamente 29.7 km desde el norte de la zona de estudio hasta el sur, atravesando en su mayor parte los depósitos lacustres y aluviales del valle. A inicios de esta se puede apreciar que se extiende a través de depósito El Caracol y hacia su final pasa cerca de la Ciudad Nezahualcóyotl. A través de la sección se pueden observar además pequeños lentes de depósitos aluviales interestratificados entre los depósitos lacustres del valle.

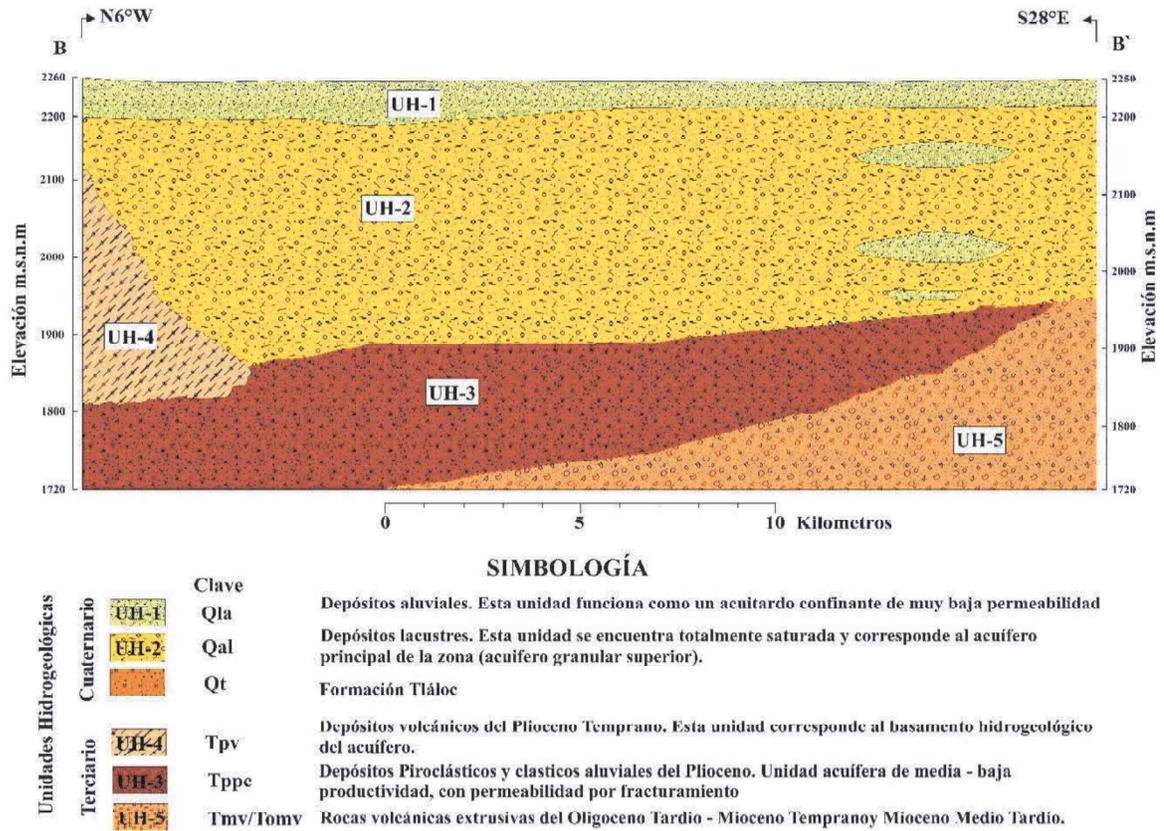


Figura 3.9. Sección hidrogeológica B-B' del acuífero Texcoco, Tomada de Suárez, 2019.

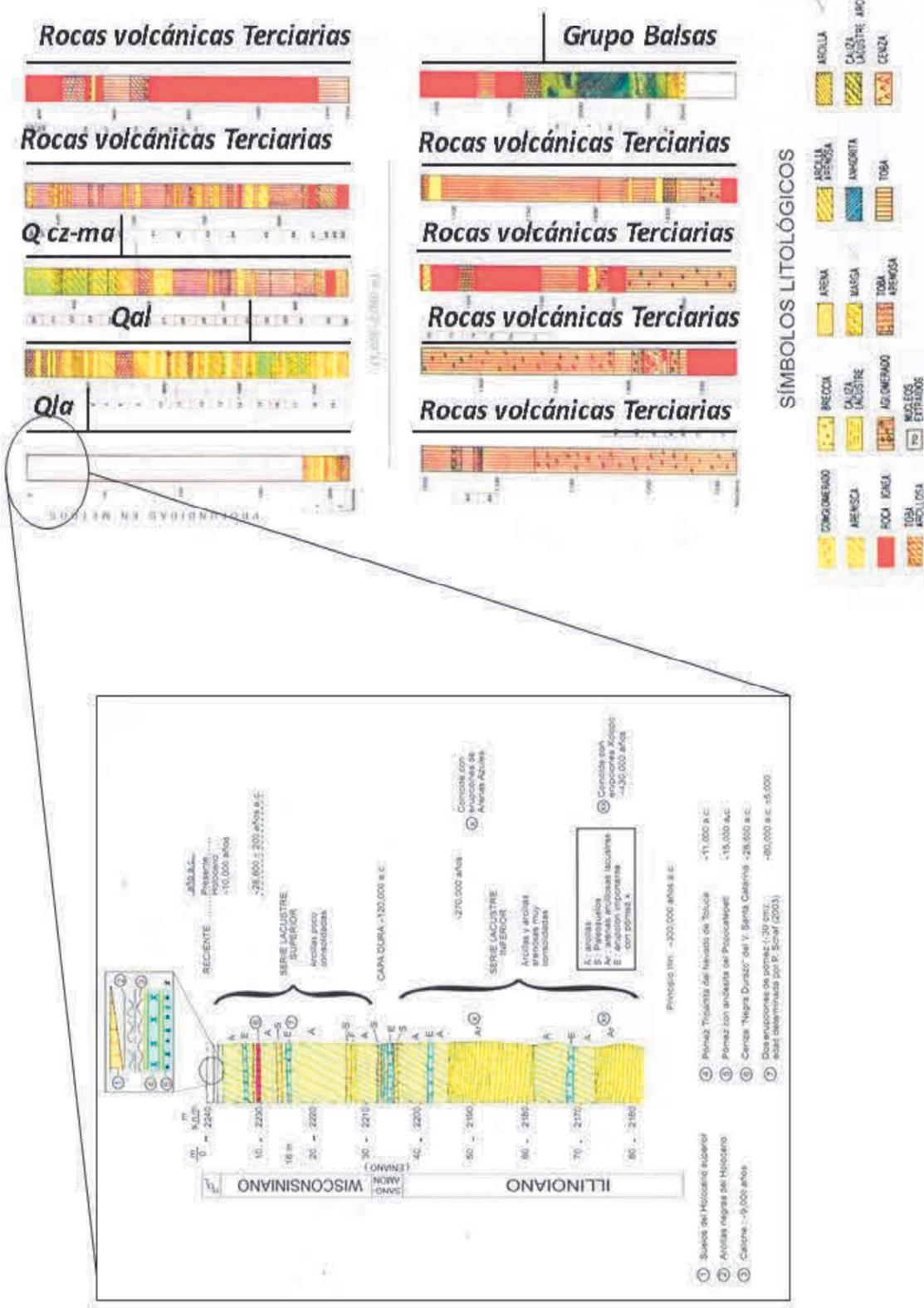


Figura 3.10. Columna estratigráfica obtenida del pozo profundo PP-1 Texcoco. Tomada de Lojero-Ochoa, 2014.

Tabla 3.3. Secuencia estratigráfica en la cuenca de México y el acuífero Texcoco (Suarez, 2019).

Era	Periodo	Época	Unidad en mapa	Litoestratigrafía	
CENOZOICO	CUATERNARIO		Qla	Depósitos de arcillas lacustres.	
			Qal	Depósitos de arena y grava.	
			Qv	Conformado de elementos y unidades Fenobasálticas o andesitas o rocas dacítico-riolíticas y a veces más ácidas.	
			Qvc	Cono volcánico del cuaternario.	
			T	Formación Tarango. Complejo volcano-sedimentario de depósitos de abanicos aluviales y lahares, intercalados con capas de pómez, cenizas, suelos, gravas y arenas de origen fluvial.	
			Qivc	Cono volcánico del cuaternario inferior.	
			Qiv	Vulcanitas del Cuaternario inferior, originadas por la emisión de grandes secuencias de flujos piroclásticos de la Formación Tepozteco; éstas afloran formando promontorios.	
			QPA	Originadas por la reactivación tectónica, con la formación de sistemas de fallas y de fracturamientos conjugados con dirección SE-NW y SW-NE, formando fosas y pilares tectónicos. Con la emisión de andesitas y dacitas porfídicas en la sierra de las Cruces. los derrames andesíticos y dacíticos están asociados con expulsiones ignimbríticas y de piroclastos de tobas traquíticas, andesíticas, brechas, arenas volcánicas, bombas y lapilli.	
	TERCIARIO	PLIOCENO		Tpv	Basaltos que ocupan los núcleos de las sierras Tepetzotlán y Guadalupe.
				Tpl	Depósitos lacustres del Plioceno. Son parte de la secuencia litológica del subsuelo de la parte noroeste de la Cuenca de México.
			Tpdc	Cono o domo del plioceno.	
			Tqt	Tobas en pie de monte, son piroclastos con granulometría limosa y arenosa que en ocasiones se interdigitan con aglomerados.	
MIOCENO			Tmv	Rocas volcánicas ácidas y que forman domos, conos y calderas. Son parte de la secuencia litológica del subsuelo de la zona en estudio.	
OLIGOCENO			Tov	Rocas volcánicas intermedias.	
EOCENO			Teob	Conglomerado Balsas o El Morro. Representada por areniscas, conglomerados y lodolitas. Aflora en la porción SE del embalse de la presa en estudio.	
MESOZOICO	CRETÁCICO	SUPERIOR	Ks	Representado por las formaciones Soyatal, Méndez, San Felipe y Agua Nueva. Están constituidas por margas, areniscas y lutitas, así como también de calizas en el caso de las formaciones Agua Nueva, San Felipe y Soyatal. En el subsuelo del poblado de Tulyehualco aparecen a los 2100 m de profundidad, considerándose el basamento conocido en la Cuenca de México.	
		INFERIOR	Ki	Depósitos de calizas que se diferencian según la localidad en las formaciones Xochicalco (Kix), Orizaba (Kio), El Doctor (Kid) y Morelos (Kim). Todas son fosilíferas y correlacionables hasta cierto grado en edad. Se infiere su presencia en la secuencia litológica del subsuelo del área en estudio.	

### **3.4. Hidrología superficial**

El sistema hidrológico en la cuenca del Valle de México, a la cual pertenece el acuífero Texcoco, está caracterizado por escurrimientos intermitentes de bajo caudal y de carácter torrencial, con avenidas de corta a mediana duración y arroyos secos durante el estiaje (Mendoza, 2012). De esta forma, en la zona de estudio se cuenta con diversas corrientes entre las que se encuentra el río Coatepec, río Quebrado, río Santa Mónica, río San Bernardino, río Chapingo, río Texcoco, río Coxacoaco, arroyo purificación arroyo Xalapango y río Papalotla, los cuales desembocan a parte del ex lago de Texcoco (Figura 3.11).

En esta zona, el drenaje es de tipo radial centrífugo, dendrítico y dendrítico paralelo. Por otra parte, es importante destacar que el escurrimiento superficial que confluye en la planicie de Texcoco es conducido a través de canales hacia el exterior de la cuenca de México, hecho que se realiza desde el siglo XIX, con el fin de atenuar las inundaciones que afectaban a esta región.

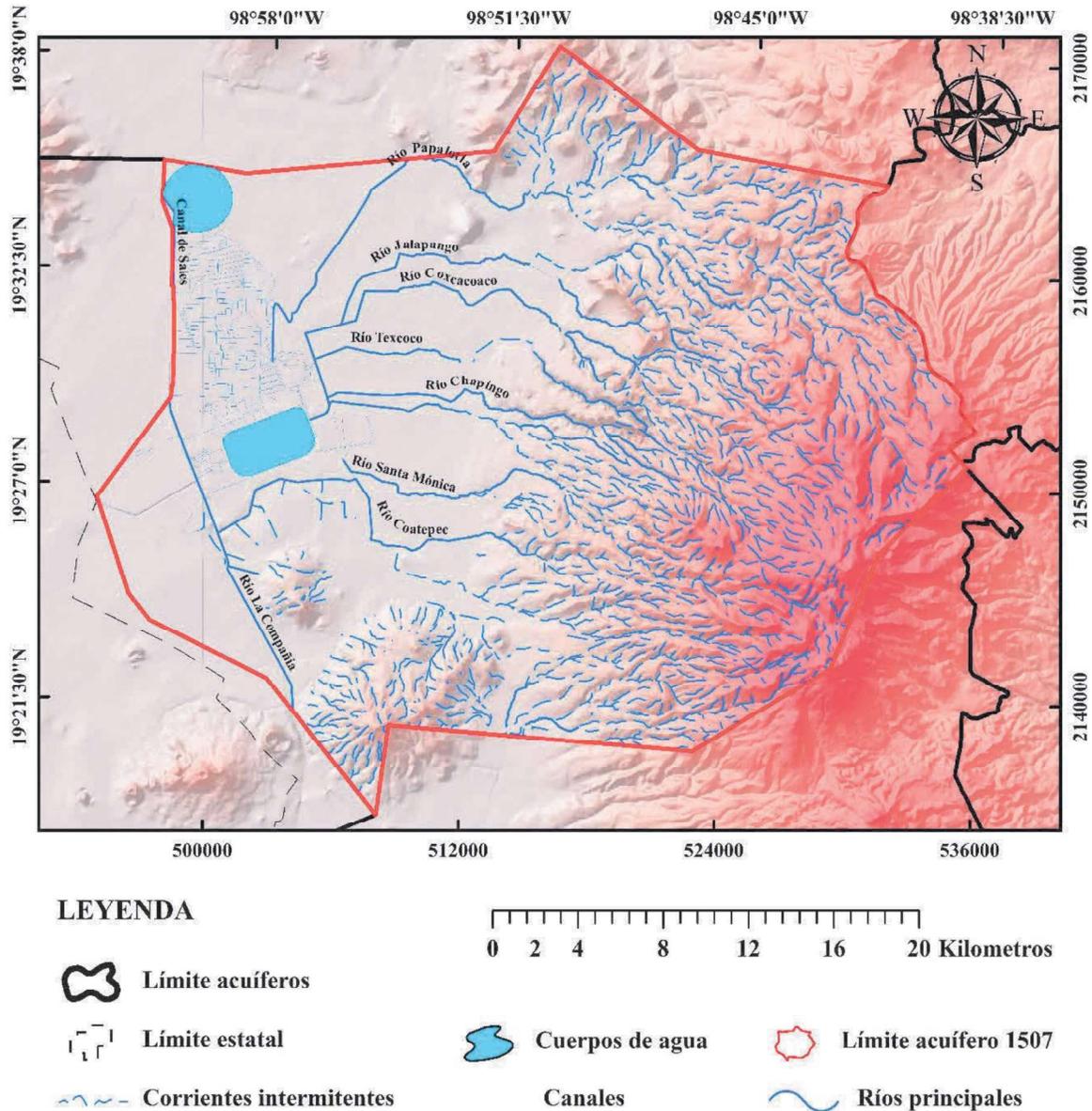


Figura 3.11. Mapa hidrológico del acuífero de Texcoco. Fuente: IFOMEGEM, 2013.

### 3.5. Hidrología subterránea

De acuerdo con las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas el subsuelo de la región del acuífero Texcoco está conformado en su porción más somera por una capa de arcillas de alta porosidad, baja permeabilidad y gran heterogeneidad (CONAGUA, 2018a). Esta capa forma un acuitardo que actúa como confinante y semiconfinante en el centro de la región. El acuitardo posee un espesor variable y sobreyace a un paquete de sedimentos aluviales, formado por arcillas, gravas, areniscas, conglomerados de origen volcánico y tobas volcánicas. Esta es la unidad en explotación del acuífero y su espesor y propiedades

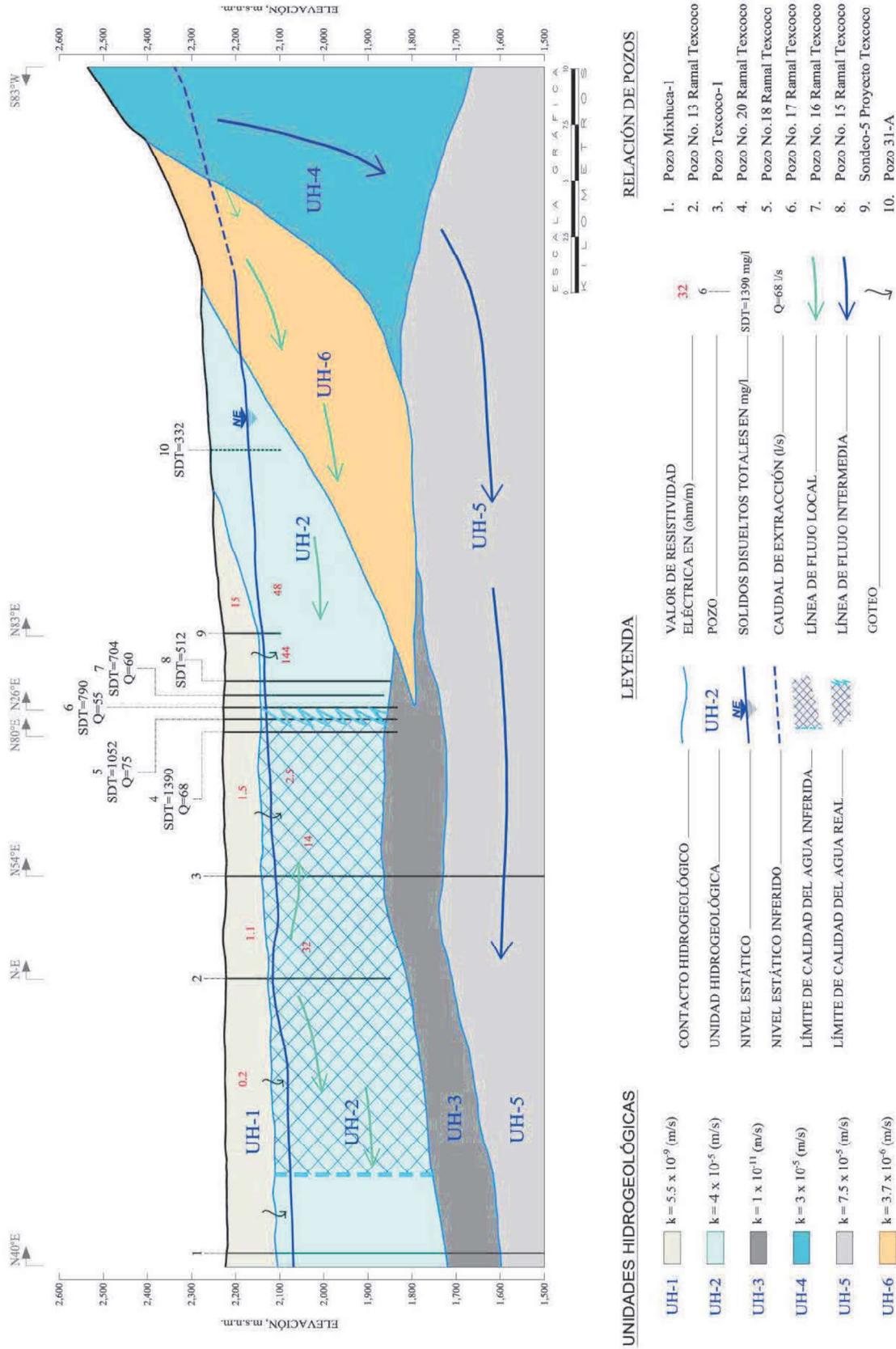
hidráulicas son variables con espesor aproximado de 400 m. A esta unidad le subyacen rocas volcánicas fracturadas, que pueden ser consideradas el basamento del acuífero y cuya base se localiza hasta los 1800 msnm en el centro del valle y disminuye hacia los márgenes de las montañas.

El acuífero Texcoco se puede definir como un acuífero de tipo libre a semiconfinado heterogéneo, anisótropo y está comunicado hacia el norte con el acuífero Cuautitlán – Pachuca (Figura 3.12), a través de materiales aluviales y lacustres de planicies. También se comunica hacia el oeste noroeste con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México a través de la continuidad de los depósitos aluviales y lacustres. Finalmente, se comunica hacia el sur con el acuífero Chalco - Amecameca, a través de materiales permeables de la Formación Tarango y de los depósitos aluviales (CONAGUA, 2018a).

En cuanto a los parámetros hidráulicos del acuífero, existen estudios previos en el acuífero y en la Cuenca del Valle de México, así como pruebas de bombeo de larga duración, realizadas tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales y por el modelo numérico de dos capas de Rathod y Rushton (1991), se establece que los valores de transmisibilidad en la zona varían de  $2.2 \times 10^{-4}$  a  $40.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , en tanto que para la conductividad hidráulica se registran valores entre  $2.3 \times 10^{-6}$  y  $7.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  (0.2 y 65.0 m/d) (CONAGUA, 2018a).

Con base en el análisis de los diferentes estudios geológicos, hidrogeológicos, geofísicos y piezométricos elaborados con anterioridad en el área de estudio, se han definido diferentes unidades hidroestratigráficas que se presentarán en posteriores secciones de la investigación.

Capítulo III. Características generales de la zona de estudio



UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

- UH-1  $k = 5.5 \times 10^{-9}$  (m/s)
- UH-2  $k = 4 \times 10^{-5}$  (m/s)
- UH-3  $k = 1 \times 10^{-11}$  (m/s)
- UH-4  $k = 3 \times 10^{-5}$  (m/s)
- UH-5  $k = 7.5 \times 10^{-5}$  (m/s)
- UH-6  $k = 3.7 \times 10^{-6}$  (m/s)

LEYENDA

- CONTACTO HIDROGEOLÓGICO
- UNIDAD HIDROGEOLÓGICA
- NIVEL ESTÁTICO
- NIVEL ESTÁTICO INFERIDO
- LÍMITE DE CALIDAD DEL AGUA INFERIDA
- LÍMITE DE CALIDAD DEL AGUA REAL

RELACIÓN DE POZOS

1. Pozo Mixhuca-1
2. Pozo No. 13 Ramal Texcoco
3. Pozo Texcoco-1
4. Pozo No. 20 Ramal Texcoco
5. Pozo No. 18 Ramal Texcoco
6. Pozo No. 17 Ramal Texcoco
7. Pozo No. 16 Ramal Texcoco
8. Pozo No. 15 Ramal Texcoco
9. Sondico-5 Proyecto Texcoco
10. Pozo 31-A

Figura 3.12. Sección hidrogeológica A-A'. Tomada de Suárez, 2019

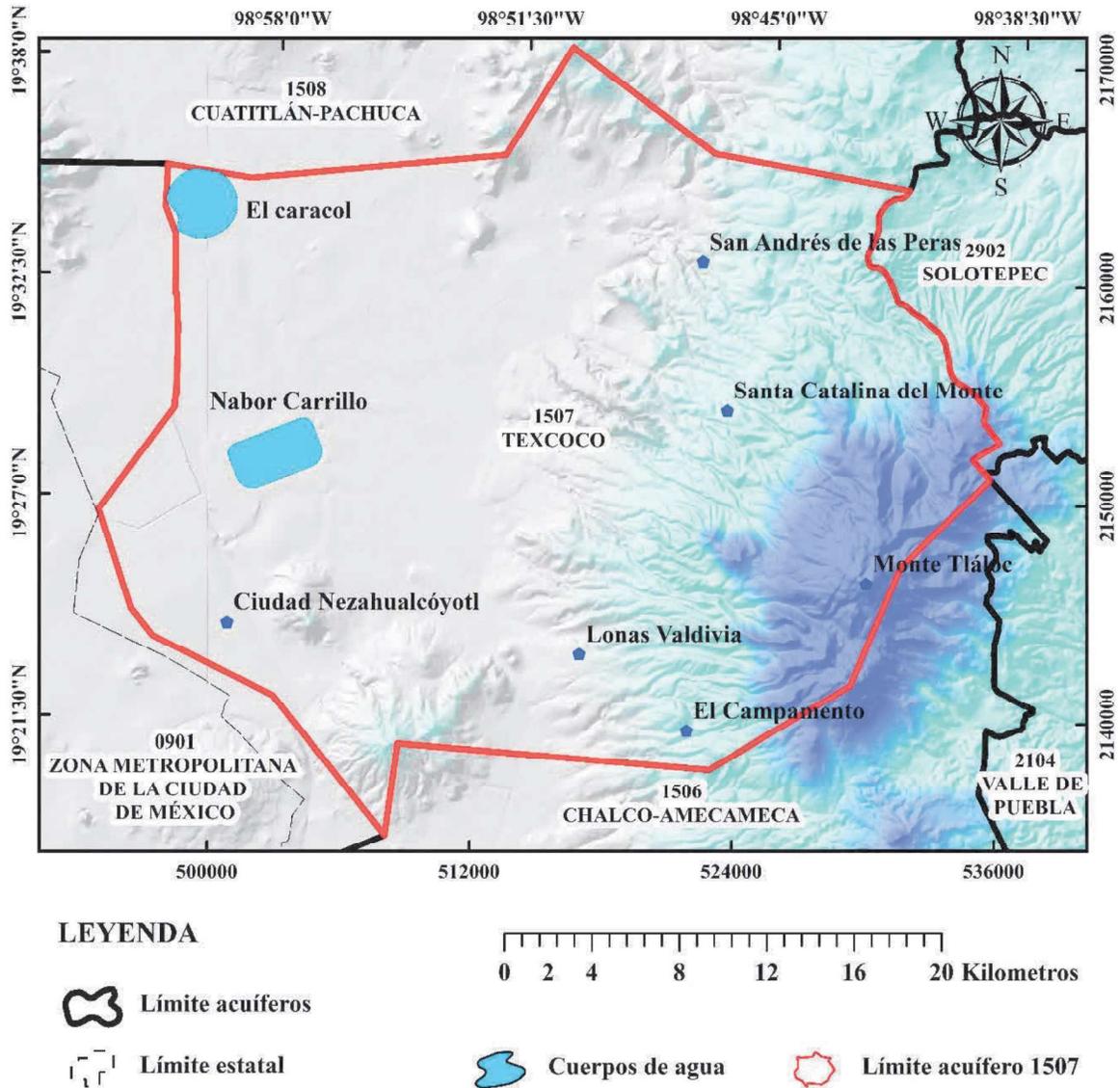


Figura 3.13. Mapa de distribución de los acuíferos en la zona.

En el área del acuífero Texcoco existe una red densa de pozos piloto que cubre en su mayor parte a las zonas bajas hacia el oeste con el Ex Lago de Texcoco, esta red de pozos pretende dar una idea del comportamiento histórico del acuífero. La red piezométrica está a cargo del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM), contiene el registro de datos de nivel del agua subterránea desde el año 1969 hasta el año 2018. Se cuenta con registros de los pozos en varios años, pero a través del tiempo la cantidad de estos pozos ha ido variando y, además, en ocasiones existen años donde no se cuenta con información de registros piezométricos.

En las Figura 3.14 y 3.15 se muestran mapas de flujo del acuífero Texcoco desarrollados por la CONAGUA, 2018a y Suárez, 2019 respectivamente. En la tabla 3.4 se pueden consultar los pozos red de monitoreo del acuífero Texcoco utilizados para la configuración piezométrica del año 2018 empleados en la investigación desarrollada por Suárez, 2019.

**Tabla 3.4. Pozos de la red de monitoreo en el acuífero Texcoco utilizados para la configuración piezométrica del año 2018.**

Clave del pozo	Longitud X	Latitud Y	Elevación en m.s.n.m.	Profundidad del nivel 2018	Elevación del nivel 2018
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
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

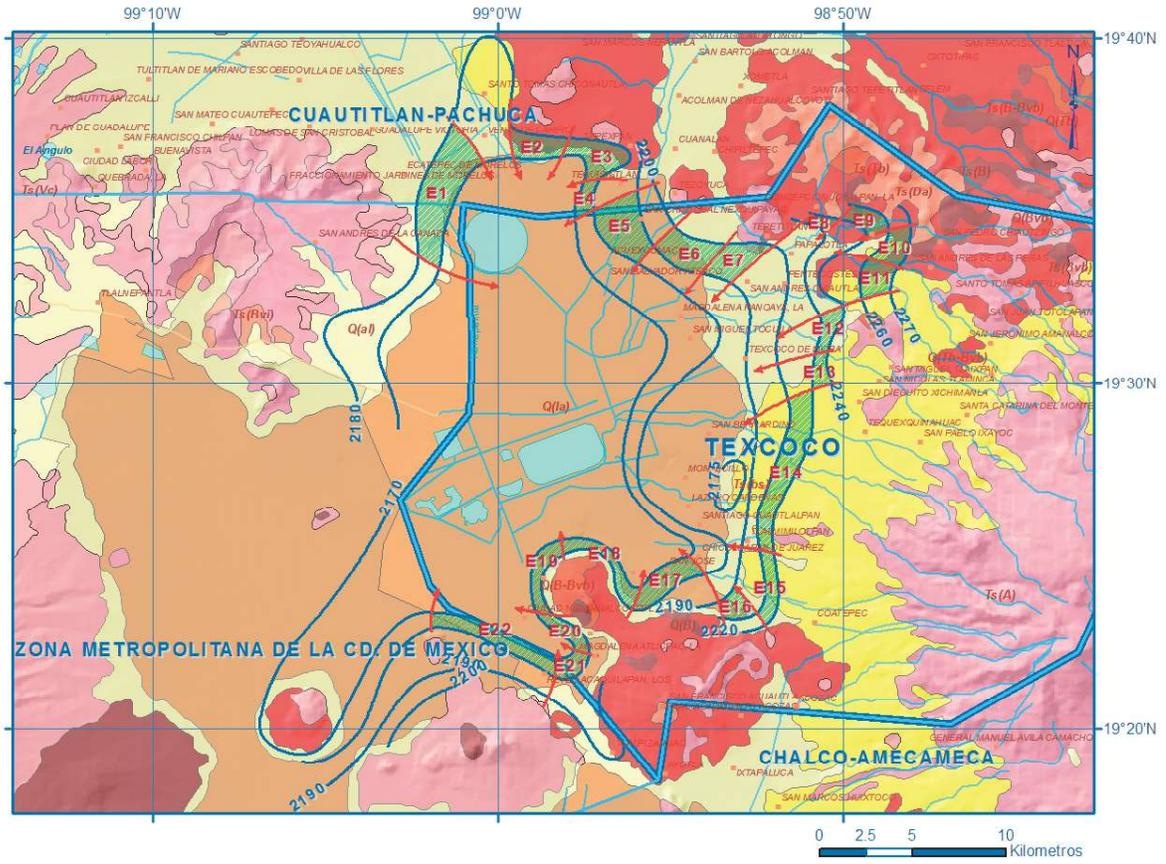


Figura 3.14. Mapa de elevación del nivel estático del acuífero Texcoco. CONAGUA, 2018a.

De acuerdo con la configuración piezométrica de investigaciones previas, el flujo de agua subterránea presenta una dirección principal proveniente de las zonas montañosas que circundan la planicie hacia el centro del Valle de Texcoco. (Figuras 3.14 y 3.15). La explotación del agua subterránea se lleva a cabo mediante pozos de extracción ubicados principalmente en la planicie. La principal salida de agua subterránea de forma horizontal se considera hacia el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Se considera que estos mecanismos han cambiado con el paso del tiempo y a causa de la explotación intensiva a la que está sometida el acuífero.

Lo anterior, evidencia un cambio en el funcionamiento hidráulico del acuífero Texcoco, ya que la recarga natural ha sido sobrepasada considerablemente por los volúmenes de extracción, provocando que las direcciones de flujo no sigan su tendencia original debido a los descensos en el nivel del agua subterránea; presentando una tasa de evolución negativa promedio 1.15 m/año (Lojero-Ochoa, 2014).

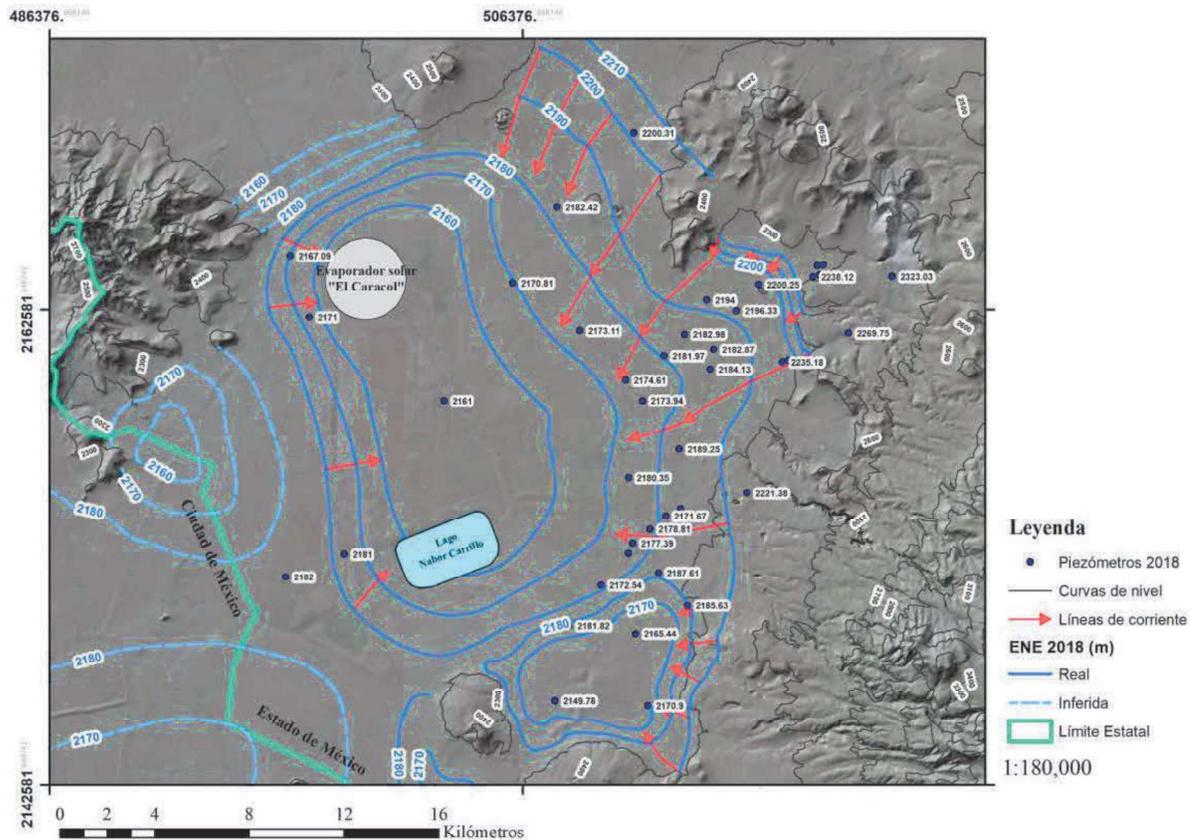


Figura 3.15. Mapa de elevación del nivel del acuífero Texcoco. Suárez, 2019.

La recarga principal del acuífero proviene de la infiltración de una parte del agua que se precipita en la región y por entradas subterráneas horizontales provenientes de las sierras que circundan al Valle en la porción este y noreste. Aunado a lo anterior, en la zona de estudio se presenta una importante recarga inducida, generada por el retorno de riego producto de la actividad agrícola y las infiltraciones derivadas del agua de consumo que no llega a su destino debido a las malas condiciones de los sistemas de abasto (SEMARNAT, 2018).

Esta problemática, así como las características complejas del acuífero Texcoco, demandan la necesidad de la aplicación de herramientas confiables que permitan generar modelos conceptuales y numéricos substanciales que conlleven a una cuantificación del recurso y una simulación adecuada del funcionamiento hidrodinámico del sistema, facilitando de este modo el desarrollo de estrategias idóneas para la preservación del agua subterránea en la zona.

## CAPÍTULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Recopilación, análisis y procesamiento de la información disponible

Para el desarrollo del proyecto de investigación se elaboró el proceso metodológico que se muestra en la Figura 4.1 y que consiste en una secuencia de actividades lógicas para conseguir los objetivos propuestos.

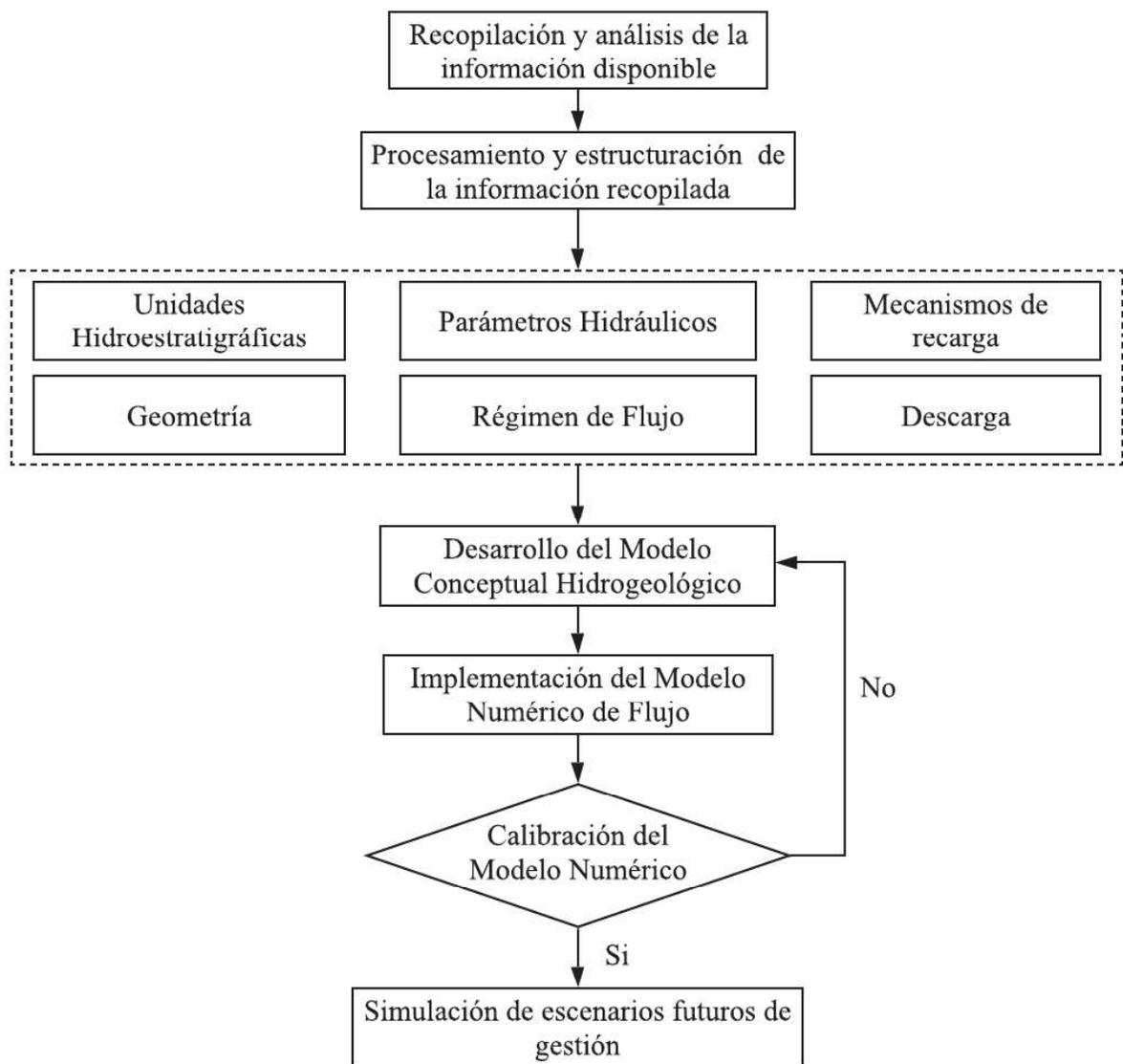


Figura 4.1. Desarrollo del modelo conceptual hidrogeológico. Modificado de Medina, 2017.

Para dar cumplimiento a la primera actividad del proceso metodológico de la presente investigación se llevaron a cabo trabajos de gabinete para recopilar y analizar la información bibliográfica disponible. Esto consistió en su mayoría, en la revisión de estudios técnicos que se han desarrollado en el acuífero de Texcoco y también en zonas cercanas dado principalmente la estrecha relación que existe con, la zona del acuífero del Valle de México y otros acuíferos cercanos.

Por otro lado, se revisó y analizó información disponible en distintas fuentes, escalas y formatos necesaria para llevar a cabo el desarrollo del modelo conceptual hidrogeológico. Entre la información analizada se encuentra la topografía y relieve, fisiografía, hidrología, edafología, uso de suelos y cobertura vegetal, características socioeconómicas y características climatológicas de la zona tales como la precipitación, temperatura, clima y evapotranspiración.

A continuación, se muestra un listado con las principales fuentes donde se obtuvo información de valor para el desarrollo de la investigación, y en la Tabla 4.1 se muestran los principales insumos que fueron requeridos en el desarrollo de las posteriores actividades.

- Comisión de Aguas del Estado de México (CAEM),
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA),
- Protección Civil del Estado de México,
- Dirección de Obras Públicas y Protección Civil de Texcoco.
- La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM),
- El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI),
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO),
- Bibliotecas del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) y la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex).

Tabla 4.1. Insumos necesarios para el desarrollo de la investigación.

Insumos	Fuente	Formato	Resolución espacial y/o temporal	Utilidad
Modelo digital de elevación (DEM)	CGIAR-CSI	Geo TIFF, resolución de 5 x 5 grados	WGS 84	Cartografía del área de estudio, delimitación del área productiva del acuífero
Localidad, población	INEGI, CONABIO	Vectorial en puntos, líneas y polígonos	WGS 84	Cartografía de caracterización del área de estudio
Límites administrativos del acuífero	CONABIO	Vectorial en líneas y polígonos	WGS 84	Mapa de ubicación del área de estudio
Hidrología	INEGI, CONABIO	Vectorial en puntos, líneas y polígonos	WGS 84	Mapa hidrológico
Geología	SGM, IFOMEGEM, CONAGUA	Vectorial en líneas y polígonos	WGS 84	Mapa geológico y mapa hidrogeológico
Evolución del nivel piezométrico	OCAVAM	Hoja de cálculo de Excel	Datos anuales del año 1969 al 2018 WGS 84 Serie I: 1980-1991	Mapa de piezometría y evolución del nivel
Uso de suelo	INE, CONABIO	Vectorial en polígonos	Serie II: 2001 Serie III: 2005 Serie IV: 2009 Serie V: 2013 y 2016	Caracterización de la zona de estudio
Edafología	CONABIO, IFOMEGEM	Vectorial en polígonos	WGS 84	Caracterización de la zona de estudio
Topografía	INEGI	Vectorial en líneas	WGS 84	Delimitación del área de recarga
Salidas del acuífero Pozos de extracción Manantiales	CONAGUA, REPDA 2019	Vectorial	WGS 84	Caracterización del área de estudio y estimación de la recarga y extracción

#### 4.2. Desarrollo del modelo conceptual hidrogeológico del acuífero Texcoco

El modelo conceptual hidrogeológico del acuífero Texcoco se presenta bajo el esquema propuesto por Vélez (2010), conforme a los datos disponibles en la zona y con la información generada y analizada de la etapa anterior de la investigación. Este modelo permite tener un mejor conocimiento hidrogeológico del acuífero y describir las características del régimen hidrogeológico, su funcionamiento, así como los impactos ambientales provocados por la explotación intensiva.

El diseño para obtener la información existente y disponible para la construcción, ajuste y adaptación del modelo conceptual hidrogeológico se realizó conforme al esquema mostrado en la Figura 4.2 y se describe a continuación:

I - *Comportamientos superficiales*, caracterizados por la fisiografía, hidrología y edafología que definen la topografía, escurrimiento y uso de suelo de la zona;

II - *Comportamiento atmosférico*, caracterizado por la climatología y que caracteriza el régimen hidrológico del lugar mediante la precipitación, evaporación y temperatura;

III - *Comportamiento subterráneo*, caracterizado por la geología e hidrogeología, permite identificar las unidades hidroestratigráficas las cuales definen la geometría, la superficie piezométrica, red de flujo, propiedades hidráulicas, fuentes y cantidad de recarga.

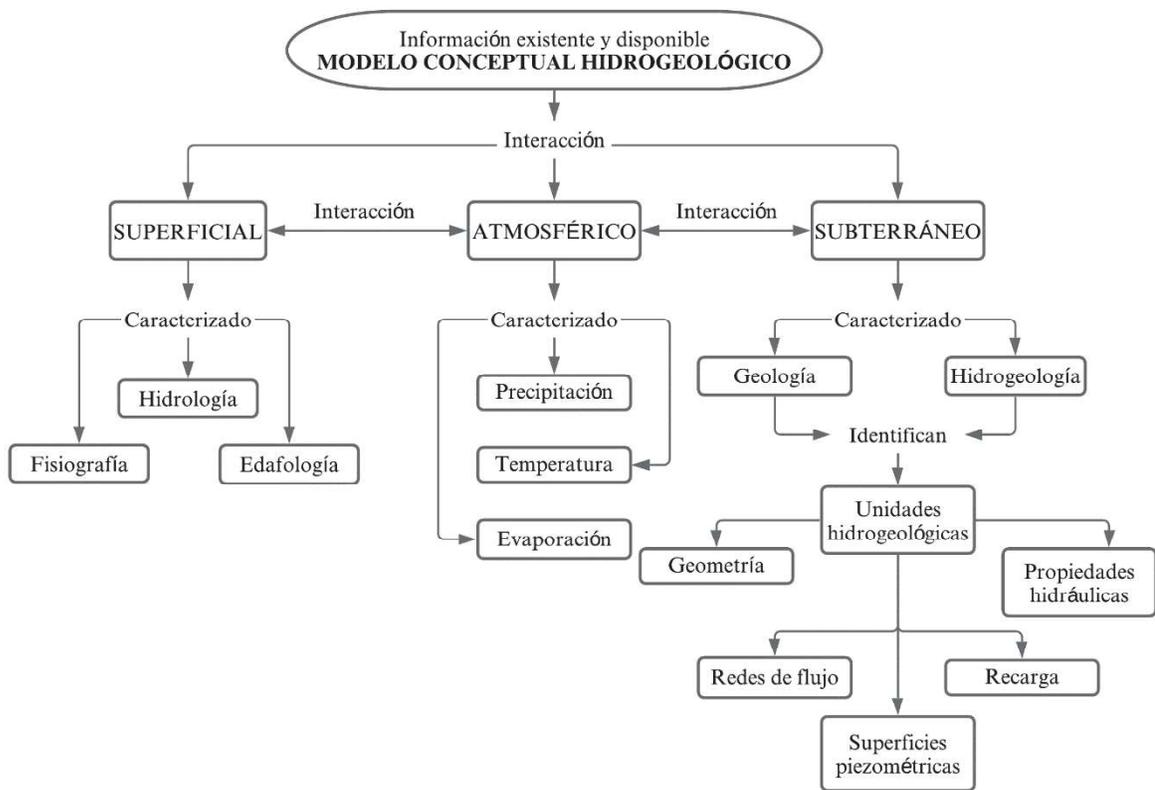


Figura 4.2. Desarrollo de un modelo conceptual hidrogeológico. Fuente: Vélez (2010).

Para el primer punto que conforman la parte superficial, se obtuvieron los datos del INEGI, para obtener la información de tipo y uso de suelo de manera cartográfica a escalas adecuadas

para su análisis, así como el Modelo de Digital de Elevación (MED) que representa de manera matricial la topografía de la zona.

El segundo punto, para el análisis climatológico, se obtuvieron datos y resultados de investigaciones que se están desarrollando en paralelo a la presente sobre la misma área de estudio (Zaragoza, 2021; Patoni, 2021).

Para el análisis de la información disponible en relación con la hidroestratigrafía, litología y evolución espaciotemporal de los niveles piezométricos, así como las direcciones y gradientes del flujo y la distribución de sus propiedades hidráulicas, se realizó un análisis de las caracterizaciones geológicas e hidrogeológicas de la zona en estudio. Con la caracterización hidrogeológica se definió las características geométricas y las propiedades hidráulicas de la zona. Para cumplir con este objetivo, se tomó en cuenta los siguientes elementos:

- **Definición de unidades hidroestratigráficas.** Con base en la información de columnas estratigráficas (de pozos, ver Figura 3.10) y las secciones geológicas propuestas por Suárez (2019) se analizó la estructura geológica superficial y subsuperficial de la zona de estudio;
- **Parámetros hidrogeológicos.** Las propiedades del acuífero fueron establecidas con base a la literatura para el tipo de material geológico del área. Así mismo, se tomó en consideración para su determinación los valores de conductividad hidráulica calibrados en el modelo numérico de flujo elaborado por la CONAGUA (CONAGUA, 2006).
- **Piezometría.** Se seleccionó, mediante la información de los niveles históricos obtenidos de pozos localizados en la zona, un amplio periodo de registro basado en la cantidad y calidad de la información (del año 2006 al año 2018). Con ello, se trató de representar la distribución espacial de los niveles en diferentes años en el período seleccionado, definiendo las superficies piezométricas, así como analizar los abatimientos en lapsos de tiempo, lo cual permitió entender la respuesta del acuífero a la extracción.

En este último componente del sistema se cuenta con información piezométrica que fue proporcionada por la Comisión de Agua del Estado de México (CAEM). Estos datos presentan niveles estáticos registrados mediante sondas a diferentes profundidades hasta el 2019. Sin embargo, no todos los pozos cuentan con información actual y otros han dejado de operar por problemas ajenos a su funcionamiento.

Conforme a la construcción de un modelo conceptual geo hidrogeológico mediante la información existente y disponible, se llevó a cabo la siguiente etapa que consiste en la modelación numérica del flujo subterráneo.

### **4.3. Implementación del modelo numérico de flujo al acuífero Texcoco**

Una vez desarrollado el modelo conceptual hidrogeológico y establecidas las condiciones del acuífero, se procedió a la implementación de un modelo numérico de flujo subterráneo mediante el uso del software Visual MODFLOW Flex (McDonald et al., 1984; Waterloo H., 2015). Se simuló el comportamiento del flujo del agua subterránea en el acuífero bajo diferentes condiciones y escenarios, evaluando las extracciones históricas del agua subterráneas mediante una simulación en estado transitorio durante el período establecido.

Los pasos a seguir durante la implementación del modelo numérico de flujo de agua subterránea del acuífero de Texcoco se describen a continuación.

#### **4.3.1. Definición del dominio y discretización**

Un aspecto fundamental en la construcción de la malla de modelación numérica es la representación de un sistema acuífero en un arreglo de bloques llamados celdas, cuyas ubicaciones se describen en términos de filas, columnas y capas. Esta configuración incluye: la definición del dominio del modelo, la distribución espacial horizontal del área de estudio, la distribución vertical de las unidades hidrogeológicas que conforman al acuífero y la temporalidad.

##### **4.3.1.1. Dominio del modelo**

El dominio del modelo numérico corresponde a la zona de mayor productividad del acuífero, es decir la zona de mayor explotación intensiva de agua subterránea y donde se ubica la

mayor concentración de pozos de extracción. Esta zona se encuentra delimitada en el modelo conceptual por los límites administrativos del acuífero y la cota topográfica que delimita al Valle de Texcoco la planicie (cota topográfica 2350 msnm). Además, que es donde se localizaron pozos que contaron con datos para obtener los parámetros hidráulicos como conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y porosidad. Definiéndose como zonas inactivas para la simulación del flujo, aquellas zonas localizadas fuera de este límite establecidos para el dominio del modelo.

#### **4.3.1.2. Discretización horizontal**

En función del dominio, se delimitó el área que conformaría el modelo de flujo del agua subterránea, se especificó el número de columnas y filas que subdividirían el área, la orientación, así como el tamaño de las celdas, considerando los criterios establecidos por Reilly y Harbaugh (2004), los cuales están relacionadas con:

- i) - La dirección predominante del flujo,
- ii) - La complejidad de la geometría del acuífero,
- iii) - La heterogeneidad del medio y,
- iv) - Los gradientes hidráulicos.

La elección del tamaño de la celda se basa en las consideraciones de Haitjema et al., (2001), que considera importante analizar los objetivos de la modelación, la escala regional, la densidad de la información para alimentar al modelo, la representación del sistema mediante cargas hidráulicas apropiadas y sobre todo evitar un esfuerzo computacional que demande mucha memoria maquina con largos tiempo de ejecución.

Por lo tanto, se definió la discretización espacial del modelo de forma horizontal mediante una malla contemplada por una serie de celdas con cierto número de filas y columnas.

#### **4.3.1.3. Discretización vertical**

La discretización vertical se determinó mediante la información de las unidades estratigráficas definidas en el modelo conceptual, con base en la información de los cortes litológicos de pozos y las secciones transversales de los modelos geológicos. Posteriormente,

se utilizó el programa Surfer en su versión 16 para crear las superficies que delimitan cada una de las capas del modelo. Finalmente, se importaron las superficies en Visual MODFLOW Flex dando lugar a un mallado en el cual las capas muestran las características reales de las unidades hidroestratigráficas.

#### **4.3.1.4. Discretización temporal**

La discretización temporal se definió con base en la disponibilidad y calidad de la información piezométrica; la tendencia de la precipitación en el área de estudio; y la respuesta de los niveles del agua subterránea en los pozos. Los periodos de estrés se definieron con base en los parámetros del sistema como los periodos de sequías, y se definieron los periodos de estrés con pasos de tiempo anuales. Debido a la situación actual y a la explotación intensiva a que está sometido el acuífero Texcoco este período de estrés quedó definido desde los años 2006 hasta el año 2018.

#### **4.3.2. Parámetros hidrodinámicos del acuífero**

Con base en las unidades hidrogeológicas se determinaron las propiedades hidráulicas de cada unidad, por lo que fue necesario asignar los valores de conductividad hidráulica (K), almacenamiento específico (Ss), rendimiento específico (Sy) y porosidad (n), para su distribución en cada capa que conforma el acuífero. Con ello se describe la capacidad del acuífero para almacenar y transmitir el agua.

Teniendo en cuenta la información y literatura consultada de estudios previos se establecieron los valores de conductividad hidráulica, almacenamiento y rendimiento específicos de las unidades hidroestratigráficas necesarios para la implementación del modelo numérico de flujo de aguas subterráneas del acuífero.

#### **4.3.3. Condiciones de fronteras**

Las condiciones de frontera son expresiones matemáticas que especifican la carga hidráulica y el flujo en los límites físicos del dominio del modelo. Definir las condiciones de frontera representa uno de los pasos más críticos en el diseño del modelo ya que es indispensable para

la resolución de las ecuaciones de flujo subterráneo. Según las características del acuífero se presentaron 3 tipos de condiciones de frontera:

I - **Frontera de flujo constante (Dirichlet, Tipo 1)**, se refiere a que el flujo del agua que fluye dentro y fuera del dominio del modelo, está en función de la carga generada cerca de la frontera y se mantiene constante, por ejemplo, entradas laterales desde acuíferos vecinos.

Para determinar la entradas y salidas de flujo de manera horizontal del acuífero de Texcoco, se aplicó la ley de Darcy (Freeze y Cherry, 1979) (Ecuación 4.1 y figura 4.3).

$$Q = K * I * A \quad (4.1)$$

Donde:

$Q$ : es el caudal en  $m^3/d$ ,  $K$ : es la conductividad hidráulica en  $m/d$ ,  $I$ : es el gradiente hidráulico y  $A$ : es el área de la sección transversal por donde pasa el flujo.

La variable de conductividad hidráulica está en relación con las propiedades establecidas para las unidades hidroestratigráficas del acuífero y el área superficial de las celdas de entrada y salida.

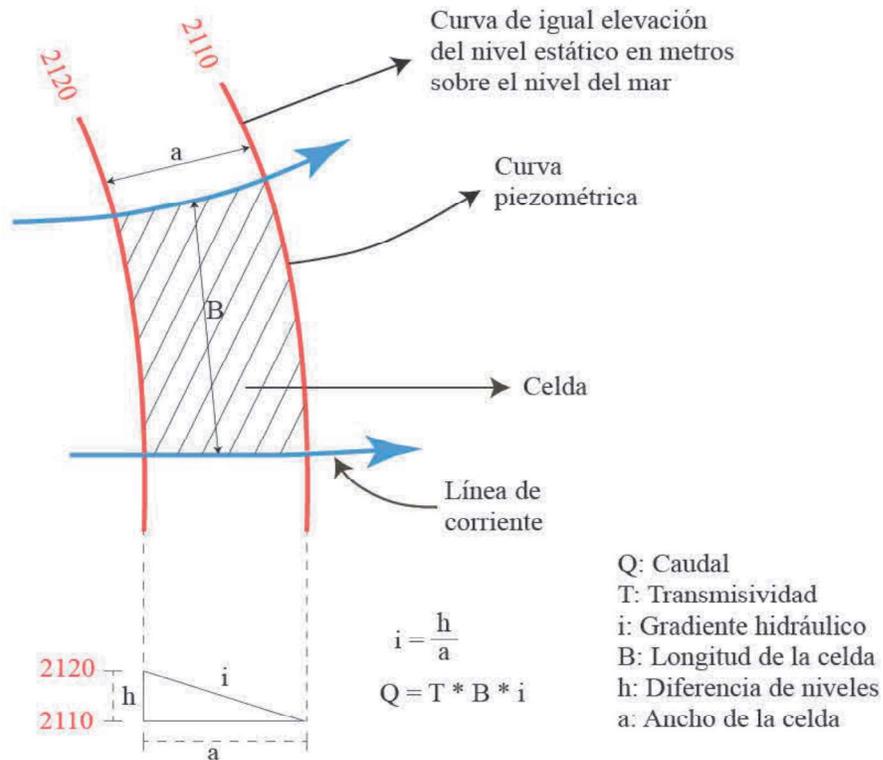


Figura 4.3. Cálculo de celdas de entrada y salida al acuífero. Elaboración con base en CONAGUA, 2018.

El gradiente hidráulico se recopiló del registro histórico del nivel piezométrico de los pozos seleccionados, realizándose las configuraciones de los niveles. Se estimó la diferencia de las elevaciones piezométricas, así como la distancia entre los pozos seleccionados.

II - *Frontera de flujo específico (Neumann, Tipo 2)*, representa un flujo de agua fijo asignado a lo largo de todo el dominio del modelo. También se representan como fronteras de no flujo, divisorias de agua subterránea y barreras impermeables.

Esta condición representa la recarga vertical por lluvia en el Valle y volúmenes por retorno por riego, aplicándose en la capa superior del dominio.

Para realizar cálculo de la recarga se decidió elegir un método de balance de agua, el cual, aplica el principio de la conservación de masa a una cierta región, definida por unas condiciones de frontera, durante un período de tiempo. La diferencia en las entradas y las salidas debe ser igual al cambio en el almacenamiento de agua.

La mayor parte de los métodos de balance de agua determinan la recarga a partir de los demás componentes de la Ecuación 4.2, este tipo de balances se puede hacer en la zona superficial y en la no saturada (Custodio et al., 1997).

$$R = P - E_s - E_t \quad (4.2)$$

Dónde:

$R$ : es la recarga;  $P$ : es la precipitación;  $E_s$ : es la escorrentía y  $E_t$ : es la evapotranspiración.

Para fines prácticos, el método a utilizar para el cálculo de la recarga es el balance de humedad del suelo, debido a que es uno de los más utilizados por su sencillez. Los datos de entrada para el balance son la lluvia y la evapotranspiración potencial, mientras que la evapotranspiración real y la recarga son los datos de salida. Los resultados de esta actividad fueron tomados del trabajo de otro compañero que se encuentra trabajando actualmente en esto (Zaragoza, 2021).

### ***Precipitación***

Para obtener la precipitación media anual, los hidrólogos emplean 3 métodos como son: aritmético, polígonos de Thiessen o isoyetas, con datos de las estaciones climatológicas de la zona. Sin embargo, estos no distribuyen espacialmente los valores de la precipitación en una superficie, por lo que se aplicaron métodos de interpolación como el Kriging. El software que se utilizó para hacer la interpolación de los datos de precipitación en todo el periodo de registro disponible es el Surfer 16.

### ***Escurrimiento***

Se define como toda agua que escurre de manera superficial debido a la precipitación que cae en la zona. Toma en cuenta información del tipo y uso de suelo y las condiciones de la topografía. El escurrimiento se puede obtener de la ecuación 4.3:

$$E_s = P * C_e \quad (4.3)$$

Dónde:

$P$ : es la precipitación media anual en mm, y  $C_e$ : es el coeficiente de escurrimiento.

Existen diversas metodologías para la obtención de este coeficiente, desde métodos que involucran información de lluvia como el método propuesto por la CONAGUA en la NOM-011-CNA-2000, hasta métodos que implican variables como el comportamiento de la pendiente del terreno como lo indica Benítez (1980) en su propuesta.

Se determinó utilizar el método de Benítez, ya que además de considerar el tipo y uso de suelo, considera también el comportamiento de la pendiente, variable importante que define la situación del estancamiento del agua y por consiguiente la recarga en una zona (Tabla 4.2).

**Tabla 4.2. Coeficiente de escurrimiento, según el método de Benítez et al., 1980**

Cobertura de suelo	Tipo de suelo	Pendiente (%)				
		> 50	20 - 50	5 - 20	1 - 5	0 - 1
Sin vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierba	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosque, vegetación densa	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

### **Evapotranspiración**

Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia se puede utilizar el método de Turc, el cual es útil para zonas donde los datos son escasos y se emplean de forma anual. Se obtiene con la ecuación 4.4:

$$ET_0 = \frac{P}{\sqrt{0.9 \frac{P^2}{L^2}}} \quad (4.4)$$

Donde:

$P$ : es la precipitación media anual en mm, y  $L$ : es una función que depende de la temperatura media anual en °C, y que está representada por la Ecuación 4.5.

$$L = 300 + 25 * t + 0.05 * t^3 \quad (4.5)$$

Donde:

$t$ : es la temperatura en °C. Para llevar termino la investigación se utilizaron valores de evapotranspiración de la zona que se pueden consultar en la literatura publica, esto debido al tiempo que consume y las grandes incertidumbres y que genera la aplicación correcta de un método como el de Turc.

III - *Frontera de carga dependiente (Cauchy, Tipo 3)*, esta es una condición de carga dependiente, y permite establecer la entrada de flujo en las fronteras del dominio del modelo con base en las cargas piezométricas en el acuífero y la carga específica en la frontera, junto con el valor de conductancia que regula la entrada de flujo al sistema (McDonald y Harbaugh, 1988; Reilly y Harbough, 2004; USGS, 2016).

La aportación del flujo en las zonas montañosas fuera del dominio se estimó con base en los resultados de la recarga para el periodo de análisis 2006 – 2018 basándose en elemento de investigaciones previas y aportaciones realizadas por el autor. Se utilizó la Ecuación 4.6, para determinar el volumen en términos de conductancia, y así incorporarlo al modelo numérico.

$$Q_b = C_b(h_b - h) \quad (5.6)$$

Donde:

$Q_b$ : es el flujo a través de la frontera en m<sup>3</sup>/día;  $C_b$ : es la conductancia de la frontera en m<sup>2</sup>/día;  $h_b$ : es la carga en o después de la frontera en metros y  $h$ : es la carga en el acuífero en metros.

#### 4.3.4. Condiciones iniciales

Se analizaron los registros de los niveles piezométricos de la región en el periodo de 1974 al 2018 y se determinó que durante todo ese periodo presentan tasas lineales de abatimiento por lo que, no es posible realizar una simulación en estado estacionario.

En este sentido, se llevó a cabo un análisis en estado transitorio, seleccionando pozos de monitoreo que son los que sufren la menor alteración. Estos pozos resultan de suma importancia ya que son indicadores del nivel del agua subterránea y sirven como puntos de calibración. Las condiciones iniciales corresponden al año 2006 y debido a que en este año el sistema se encuentra cuasiestabilizado, es decir debido a la explotación intensiva que se ha producido en la zona por décadas en acuífero presenta valores lineales en su ritmo de abatimiento.

#### **4.3.5. Bombeos y extracción**

Los pozos de extracción existentes en el dominio del modelo fueron establecidos con base en los datos del REPDA del año 2019 y la base de datos proporcionados por la CONAGUA. Los parámetros requeridos por el Visual MODFLOW Flex para la asignación de los pozos de bombeo incluyen: coordenadas, profundidad del pozo, longitud del ademe ranurado y datos de caudales de extracción. La longitud del ademe ranurado se determinó mediante la correlación de las columnas estratigráficas donde se incluyen los datos técnicos de construcción de los pozos y los pozos típicos de la zona de estudio. En el anexo 1 se puede consultar la base de datos de pozos de extracción.

#### **4.3.6. Calibración del modelo**

Durante el proceso de calibración se ajustaron los parámetros para obtener una buena aproximación al comportamiento del acuífero de acuerdo con lo planteado en el modelo conceptual. El proceso se llevó a cabo mediante el método de prueba-error (Figura 4.4). La estrategia de la simulación se basó en la variación de los valores de las propiedades y parámetros en las fronteras del modelo, así como en el orden de los puntos de calibración definidos mediante un criterio espacial, por ejemplo, calibrar zonas donde se presenta una topografía alta y lejanas al valle donde se presentan las extracciones importantes (Navarro, 2005).

Se buscó realizar el mejor ajuste que minimice las diferencias entre los resultados dados por el programa y las observaciones en campo (niveles piezométricos). El periodo de calibración fue de 2006 al 2018.

Con el análisis de sensibilidad se cuantificó la incertidumbre causada por la estimación de los parámetros y sus condiciones de frontera. Para ello, se llevó a cabo simulaciones en un régimen de flujo transitorio, en las que se cambió únicamente un parámetro o una acción en cuestión, manteniendo el resto constante.

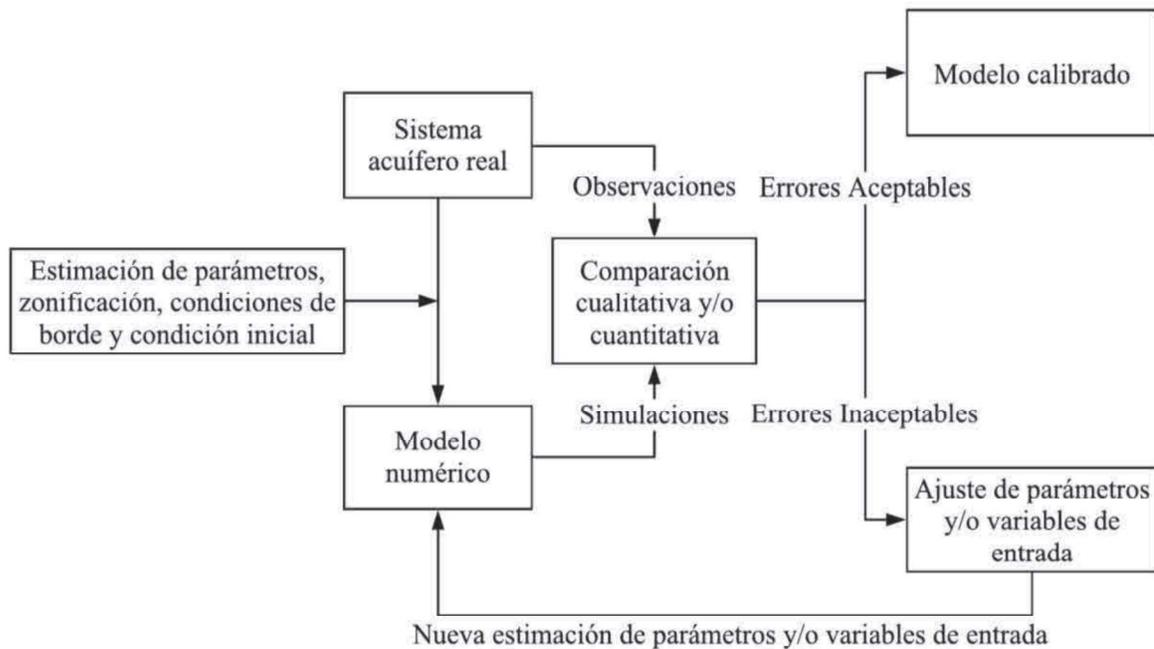


Figura 4.4. Calibración de un modelo de flujo de aguas subterráneas por prueba y error (SEA, 2012).

## **CAPÍTULO V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

El presente capítulo de la investigación tiene como finalidad, mostrar los resultados obtenidos con base a lo establecido en la metodología planteada por lo que, se consideran varias secciones para subdividir el capítulo. Primero se llevará a cabo una breve descripción del trabajo de gabinete desarrollado y la información consultada en el proceso. Posteriormente se abordará lo relacionado con los resultados del desarrollo del modelo conceptual hidrogeológico del acuífero Texcoco. Más adelante se plasmarán los resultados obtenidos para la implementación del modelo de simulación numérica del flujo del agua subterránea en el acuífero con base en el modelo conceptual y, por último, los resultados generados por la simulación de escenarios futuros de gestión.

### **5.1. Procesamiento de la información**

Con base en el análisis y procesamiento de la información disponible se definió el modelo conceptual hidrogeológico que permitió comprender el comportamiento del acuífero. Este modelo sirvió de base para el análisis del movimiento del agua subterránea por medio de la modelación numérica del flujo, donde inicialmente, se aplicó el modelo para un estado estacionario, siempre y cuando se representen las condiciones del agua subterránea previas a la explotación y finalmente se realizará un análisis con un flujo transitorio, con lo que se evaluarán los efectos históricos y futuros de la extracción del agua subterránea del acuífero.

Conforme al modelo conceptual hidrogeológico y el modelo numérico de flujo, se establecerá un método, con base en criterios como reducción del bombeo y establecimiento de pozos de infiltración de agua de lluvia u otras previamente tratadas. Por último, y con base en las variables más viables en la evaluación del comportamiento para escenarios futuros, se contemplará el mantenimiento de los ritmos de extracción actual y las variaciones en la recarga, para estimar los cambios en la intensidad de explotación y sus posibles impactos en los procesos ambientales.

## 5.2. Desarrollo de un modelo conceptual hidrogeológico del acuífero Texcoco

Como resultado del análisis de la información disponible, se desarrolló un marco hidrogeológico de la zona de estudio, en el que se incluyó información importante sobre las características geológicas e hidrogeológicas, ubicación y procesamiento de datos de cortes litológicos, pruebas de bombeo, y fuentes principales de agua subterránea con características como: ubicación, caudales de extracción, niveles del agua subterránea e información sobre las características climatológicas de la zona de estudio.

El conocimiento generado con el marco hidrogeológico dio paso a la elaboración de los elementos básicos para la construcción del modelo conceptual hidrogeológico, que incluye: dominio del modelo, definición de las unidades hidroestratigráficas, propiedades hidráulicas y régimen de flujo de agua subterránea. Los resultados y análisis obtenidos en cada uno de estos componentes se describen a continuación.

### 5.2.1. Definición de las unidades hidroestratigráficas y parámetros hidráulicos

#### 5.2.1.1. Unidades hidroestratigráficas

Las unidades presentan un amplio rango en sus parámetros hidrodinámicos, están comunicadas hidráulicamente, sobre todo entre los aluviales y las rocas volcánicas recientes. La interrelación de la primera (paquete arcilloso) con la segunda (material granular aluvial) ha quedado demostrada por la subsidencia que afecta la Ciudad de México (CONAGUA, 2007 y 2018).

Cada una de las capas del modelo excluyendo la del terreno fue generada con datos de las secciones geológicas, interpolados de forma manual y con la ayuda del software Surfer en su versión 16. Los datos para generar la superficie del terreno se obtuvieron de un Modelo Digital de Elevaciones y de igual forma fueron interpolados en Surfer para generar dicha superficie. Una vez generadas las superficies se importaron al software Visual MODFLOW Flex. Este software a la hora de importar superficies solo acepta los siguientes formatos (\*.txt, \*.asc, \*.grd y \*.dem), por lo que, todas las superficies generadas fueron procesadas a un mismo formato de salida (\*.grd).

### **Primera Unidad hidroestratigráfica (UH-1)**

Está representada 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 STD, lo que provoca que la unidad presente resistividades muy bajas de 1 a 10 Ohm/m (Suarez, 2019).

Hidrogeológicamente se comporta como un acuitardo confinante de muy baja permeabilidad; se le asigna un valor de conductividad hidráulica de  $5.5 \times 10^{-9}$  m/s y un rendimiento específico de 0.03, tomado de CONAGUA (2006a). Además de acuerdo con los valores establecidos por Domenico (1972) para arcillas plásticas se le asigna un valor de almacenamiento específico en el orden de  $1.13 \times 10^{-2}$ .

### **Segunda Unidad hidroestratigráfica (UH-2)**

De los 80 m y hasta los 300 m profundidad se encuentra un paquete arenogravoso intercalado ocasionalmente con lentes arcillosos, derrames volcánicos y capas de cenizas. Esta unidad se encuentra totalmente saturada y corresponde al acuífero principal en explotación de la zona. El acuífero se caracteriza por presentar agua de mediana calidad, variando de los 600 a 2.000 ppm de STD dependiendo de dónde se extraiga agua, dando como resultado resistividades eléctricas que varían de 30 a 70 Ohm/m (Suarez, 2019).

Con base en las pruebas de bombeo realizadas en el estudio de CONAGUA (2012), se decidió proponer un valor para esta unidad de  $4 \times 10^{-5}$  m/s. Los valores de rendimiento específico y almacenamiento específico fueron asociados a los valores calculados por CONAGUA, (2006a); rendimiento específico ( $S_y$ ) de 0.15 y según Domenico, (1972), almacenamiento específico ( $S_s$ ) de  $7.4 \times 10^{-5}$  correspondiente al valor medio para grava arenosa densa.

### **Tercera Unidad hidroestratigráfica (UH-3)**

La tercera unidad hidroestratigráfica del acuífero Texcoco constituye el basamento hidrogeológico del acuífero principal. A una profundidad de 300 m se encuentra un paquete compuesto por depósitos piroclásticos, calizas lacustres y margas (Tppc) de unos 150 m de

espesor, compacta y de baja a nula permeabilidad que han sido detectadas en las exploraciones profundas realizadas por SHCP (1969).

La UH-3 se caracterizan por tener resistividades eléctricas mayores a los 38 Ohm/m. Su conductividad hidráulica fue calculada con base en la información publicada por Domenico y Schwartz (1990) y tiene valores de  $1 \times 10^{-11}$  m/s. El rendimiento específico ( $S_y$ ) con valor de 0.14 se asoció al valor medio para calizas publicado por Morris y Johnson (1967) y a su almacenamiento específico con valor de  $1 \times 10^{-7}$  fue asociado a los valores para rocas sólidas publicado por Domenico (1972). Se desconocen los niveles de calidad del agua para esta unidad.

#### **Cuarta Unidad hidroestratigráfica (UH-4)**

Esta unidad hidroestratigráfica está constituida por las coladas lávicas que forman parte de la Sierra Rio Frio y Santa Catarina (Qt, Qpp, Tpv), cuentan con un espesor máximo en el centro de la Sierra Rio Frio de 1800 m y se acuña hacia los alrededores. Constituyen una unidad de alta productividad en rocas volcánicas localizadas en zonas de mayor elevación correspondientes a la zona de recarga.

La unidad tiene con una conductividad hidráulica por fracturamiento de alrededor de  $3 \times 10^{-5}$  m/s y rendimiento específico  $S_y$  de 0.04, valores que fueron tomados del estudio de CONAGUA (2006a). Para el almacenamiento específico ( $S_s$ ) se consideró un valor medio de  $3.6 \times 10^{-5}$  establecido por Domenico (1972) para rocas fracturadas.

#### **Quinta Unidad hidroestratigráfica (UH-5)**

La UH-5 está compuesta por depósitos acuíferos en rocas fracturadas de productividad media a baja del Oligoceno Tardío – Mioceno Temprano que se encuentran alojados en secuencias de rocas volcánicas (tobas y brechas) interestratificadas con lavas de tipo andesítico (Tmv, Tomv).

Tienen un espesor superior a los 1500 m con valores de conductividad hidráulica de  $7.5 \times 10^{-5}$  m/s (CONAGUA 2006) y debido a la falta de datos de campo, se consideró un rendimiento específico ( $S_y$ ) para tobas de 0.2 propuesto por Morris et al. (1967) y un almacenamiento específico ( $S_s$ ) medio para rocas fracturadas de  $3.6 \times 10^{-5}$  (Domenico, 1972).

### **Sexta Unidad hidroestratigráfica (UH-6)**

La UH-6 está 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 y cuenta con un espesor promedio de 350 metros.

La UH-6 tiene valores de conductividad hidráulica y rendimiento específico calculados en campo de  $3.7 \times 10^{-6}$  m/s (Goevaluaciones y Perforaciones S.A. de C.V., 2012) y 0.2 (CONAGUA 2006) respectivamente. Para el valor del almacenamiento específico, se consideró lo establecido por Domenico (1972) asociado al valor medio dentro del campo de rocas fracturadas el cual es  $3.6 \times 10^{-5}$  (Suárez, 2019).

Las claves de las unidades hidroestratigráficas, su descripción geológica, valores de conductividad (K), rendimiento específico (Sy), Almacenamiento específico (Ss), espesor medio en metros, y su descripción hidrogeológica se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Unidades hidroestratigráficas del acuífero Texcoco. Elaborada con datos de Suárez, 2019.

Unidad Hidrogeológica	Descripción Litológica	K (m/s)	Fuente	S <sub>y</sub>	Fuente	S <sub>s</sub>	Fuente	SDT	Espesor medio
UH-1	Arcillas muy deformables bentónicas y montmorilloníticas, con carbonato de calcio, intercaladas con lentes o estratos arenosos y limo arenosos de ceniza y vidrio volcánico delgados (Qla)	5.5x10 <sup>-9</sup>	Rudolph et al, (1991)	0.03	CONAGUA (2006a)	1.13x10 <sup>-2</sup>	Domenico (1972)	X	80 m
UH-2	Paquete areno-gravoso intercalado ocasionalmente con lentes arcillosos, derrames volcánicos y capas de cenizas (Qal)	4x10 <sup>-5</sup>	CONAGUA (2012)	0.15	CONAGUA (2006a)	7.4x10 <sup>-5</sup>	Domenico (1972)	150-1390	220 m
UH-3	Tobas, calizas lacustres y margas (Tppc)	1x10 <sup>-11</sup>	Domenico & Schwartz (1990)	0.14	Domenico (1972)	1x10 <sup>-7</sup>	Domenico (1972)	X	150 m
UH-4	Tobas cristalinas, vítreas, líticas y pumíticas intercaladas con derrames lávicos y autobrechados que forman parte de la Sierra Rio Frio y Santa Catarina (Tpv, Qt y Qpp)	3.4x10 <sup>-5</sup>	CONAGUA (2006a)	0.04	CONAGUA (2006a)	3.6x10 <sup>-5</sup>	Domenico (1972)	508-3596	1800 m
UH-5	Secuencias de tobas líticas, cristalinas y vítreas, brechas tobáceas y aglomerados, interestratificadas con lavas de tipo andesítico. (Tmv/Tomv)	7.4x10 <sup>-5</sup>	CONAGUA (2006a)	0.2	Morris & Johnson (1967)	3.6x10 <sup>-5</sup>	Domenico (1972)	136-204	> 1500 m
UH-6	Depósitos piroclásticos (tobas y lahares) que fueron originados por procesos gravitacionales y eruptivos los cuales se encuentran interdigitados con cenizas y lavas del Cuaternario (Tpt)	3.7x10 <sup>-6</sup>	Geoevaluaciones y Perforaciones S.A. de C.V. (2012)	0.2	CONAGUA (2006a)	3.6x10 <sup>-5</sup>	Domenico (1972)	196-524	350 m

### **5.2.1.2. Parámetros hidráulicos**

De acuerdo con la información proporcionada por la Comisión de Cuenca de Aguas del Valle de México y los estudios hidrogeológicos disponibles, en el Valle de México se ha realizado diversas pruebas de bombeo en diferentes años, sin embargo, en el área correspondiente al acuífero de Texcoco se cuenta con tan solo dos pruebas de bombeo.

Debido a la falta de pruebas de bombeo, las propiedades del acuífero fueron establecidas mediante la correlación de las propiedades hidráulicas de los acuíferos vecinos, datos de aforo en pozos cercanos y con base en lo establecido en la literatura para el tipo de material geológico del área. Así mismo, se tomó en consideración para su determinación los valores de conductividad hidráulica calibrados en el modelo numérico de flujo elaborado por la CONAGUA en el año 2006.

### **5.2.2. Análisis de la evolución piezométrica**

La configuración del régimen de flujo del agua subterránea se elaboró con base en la información de la red piezométrica del Valle de México a cargo del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM).

Los datos piezométricos seleccionados para establecer la configuración del régimen de flujo y la temporalidad de análisis, corresponden a los años en los que se cuenta con una cobertura temporal estable y a períodos estratégicos para el análisis de la evolución y estado actual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero Texcoco. Una vez seleccionada la información piezométrica más conveniente, los niveles del agua subterránea fueron interpolados a mano.

De esta forma, con la finalidad de analizar el comportamiento del agua subterránea en el acuífero y los cambios que se han presentado a lo largo de los años, se analizaron y elaboraron configuraciones piezométricas de los años 2006 y 2018. De acuerdo con estas configuraciones, se determinó que la principal fuente de recarga para el acuífero proviene de la Sierra Nevada ubicada al Este y el Volcán la Caldera que se encuentra al Sur, favoreciendo el flujo hacia la zona centro y Oeste del acuífero, siendo el centro la zona con la mayor concentración de pozos de extracción.

Para la configuración piezométrica del año 2006, se utilizaron 66 pozos de observación (Tabla 5.2) con datos de medición de la profundidad del nivel piezométrico y a partir de ellos se obtuvo la elevación del nivel piezométrico y la construcción del mapa de red de flujo para este año (Figura 5.1).

Para la configuración piezométrica del año 2018, se contó con información de 34 pozos de observación (Tabla 5.3) con datos de medición de la profundidad del nivel piezométrico y a partir de ellos se obtuvo la elevación del nivel piezométrico y la construcción del mapa de red de flujo para este año (Figura 5.2).

**Tabla 5.2. Pozos de la red de monitoreo en el Acuífero Texcoco utilizados para la configuración piezométrica del año 2006.**

Clave del pozo	Longitud X	Latitud Y	Elevación en msnm	Profundidad del Nivel 2006	Elevación del nivel 2006
.58-A	511231	2158714	2244	16.42	2227.58
.B-273.	507830	2166924	2244	14.49	2229.51
.C-953V	512686	2160290	2252	17.25	2234.75
.EA-47	505668	2165526	2242	8.60	2233.40
.EA-69	514070	2159991	2257	23.58	2233.42
.EA-82.	515788	2161123	2272	27.77	2244.23
.EB-15	514299	2160088	2258	25.24	2232.76
.EC-35	508743	2164656	2254	10.59	2243.41
.EC-36	508241	2164156	2247	11.00	2236.00
.ED-12	512356	2160643	2251	18.37	2232.63
.EJ-18	516804	2159534	2275	42.78	2232.22
.EJ-72	518830	2164447	2293	19.48	2273.52
.EJ-86	517603	2160466	2280	35.79	2244.21
.EK-54	519085	2164481	2295	22.71	2272.29
.EK-62	514946	2159566	2262	31.77	2230.23
.EL-03	516252	2165441	2282	31.00	2251.00
.EL-87V	515421	2162547	2263	23.38	2239.62
.EM-03	514170	2162998	2258	23.05	2234.95
.EN-58	513801	2158046	2258	26.36	2231.64
.EN-83	511442	2158767	2246	19.00	2227.00
.EN-97	511506	2157613	2244	26.36	2217.64
.EO-20.	512999	2156719	2252	23.20	2228.80
.EO-53	513268	2158986	2255	23.95	2231.05
.EP-38	514273	2156651	2287	46.19	2240.81
.EP-47.	514051	2154378	2317	65.86	2251.14
.EP-55V	511765	2153340	2253	19.96	2233.04
.EP-87	510721	2159609	2245	17.25	2227.75
.ER-14	511021	2152754	2248	14.83	2233.17
.ER-26V	509692	2150985	2245	15.82	2229.18
.ER-27V	510843	2152323	2245	13.55	2231.45
.ER-87V	512431	2153896	2252	27.92	2224.08
.ER-88	513050	2154210	2265	36.49	2228.51
.ER-96	512131	2151504	2260	27.11	2232.89
.ES-05V	513344	2150127	2296	59.07	2236.93
.ES-07	511957	2150195	2265	43.66	2221.34
.ES-65	510452	2150806	2253	20.16	2232.84
.ES-85	512348	2151054	2263	41.05	2221.95

*Capítulo V. Análisis y discusión de resultados*

---

---

**Continuación de la tabla**

---

.ES-98	511992	2149282	2265	38.31	2226.69
.ES-99	513005	2149487	2281	53.65	2227.35
.ET-04	510625	2149985	2258	26.60	2231.40
.ET-77.	508333	2149284	2219	9.72	2209.28
.EW-39	511100	2154062	2250	23.87	2226.13
.EW-55	508889	2154433	2243	9.64	2233.36
.E-44.	511128	2169121	2258	20.70	2237.30
.E-866	511392	2162543	2248	16.71	2231.29
.F-131	508852	2147119	2243	12.34	2230.66
.F-242	508749	2146340	2245	13.22	2231.78
.F-626.	507742	2146091	2244	13.04	2230.96
.F-992.	511682	2145890	2252	42.77	2209.24
.31-A	516534	2158640	2278	45.12	2232.89
.45-AV	515628	2157261	2284	48.96	2235.04
.46-A	516033	2157053	2298	64.58	2233.42
.E-194	506280	2168573	2248	13.60	2234.40
.E-598	500397	2168384	2250	12.96	2237.04
.5821	496653	2138122	2249	16.87	2232.13
.6501	488999	2148946	2230	15.53	2214.47
.6695	491682	2152243	2234	12.55	2221.45
.8138	492163	2159518	2239	21.06	2217.94
.76-B	493235	2157321	2238	13.61	2224.39
.2599	490268	2136564	2249	24.76	2224.24
.5681-V	489145	2138768	2252	26.85	2225.15
.5977-V	492616	2140504	2240	16.23	2223.77
.B-936	504038	2138842	2258	27.75	2230.25
.BX-60	494565	2160579	2238	14.30	2223.70
.GO-83	505783	2141304	2260	27.35	2232.65
.RN-4	490910	2134332	2250	19.10	2230.90

---

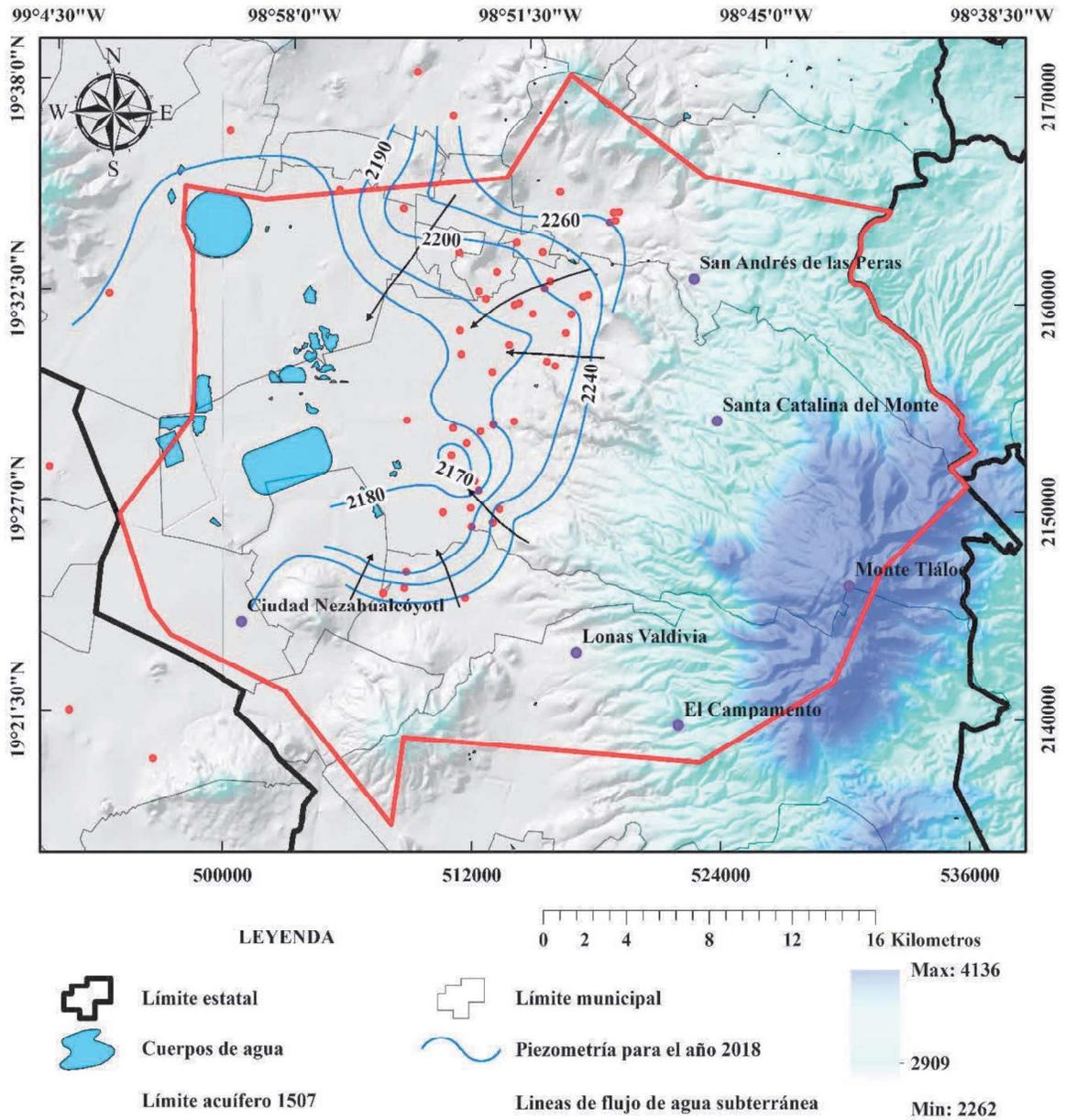


Figura 5.1. Mapa de piezometría para el año 2006.

Para el año 2006 se observa que la isolinéa del nivel de agua subterránea más baja y que está en el orden de los 2170 msnm se encuentra hacia la planicie del acuífero cerca de donde se encuentra la mayor concentración de pozos.

**Tabla 5.3. Pozos de la red de monitoreo en el Acuífero Texcoco utilizados para la configuración piezométrica del año 2018.**

Clave del pozo	Longitud X	Latitud Y	Elevación en m.s.n.m.	Profundidad del nivel 2018	Elevación del nivel 2018
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
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

Para el año 2018 se observa en la planicie del acuífero que las isolíneas de nivel del agua subterránea con el menor valor son las de 2170 y 2176 msnm y se ubican donde se encuentra la mayor concentración de pozos de extracción.

De forma general, se observa que el régimen de flujo del acuífero ha cambiado en el tiempo, asociado a la explotación intensiva a la que está sometida el acuífero y el incremento de pozos de extracción en el área.

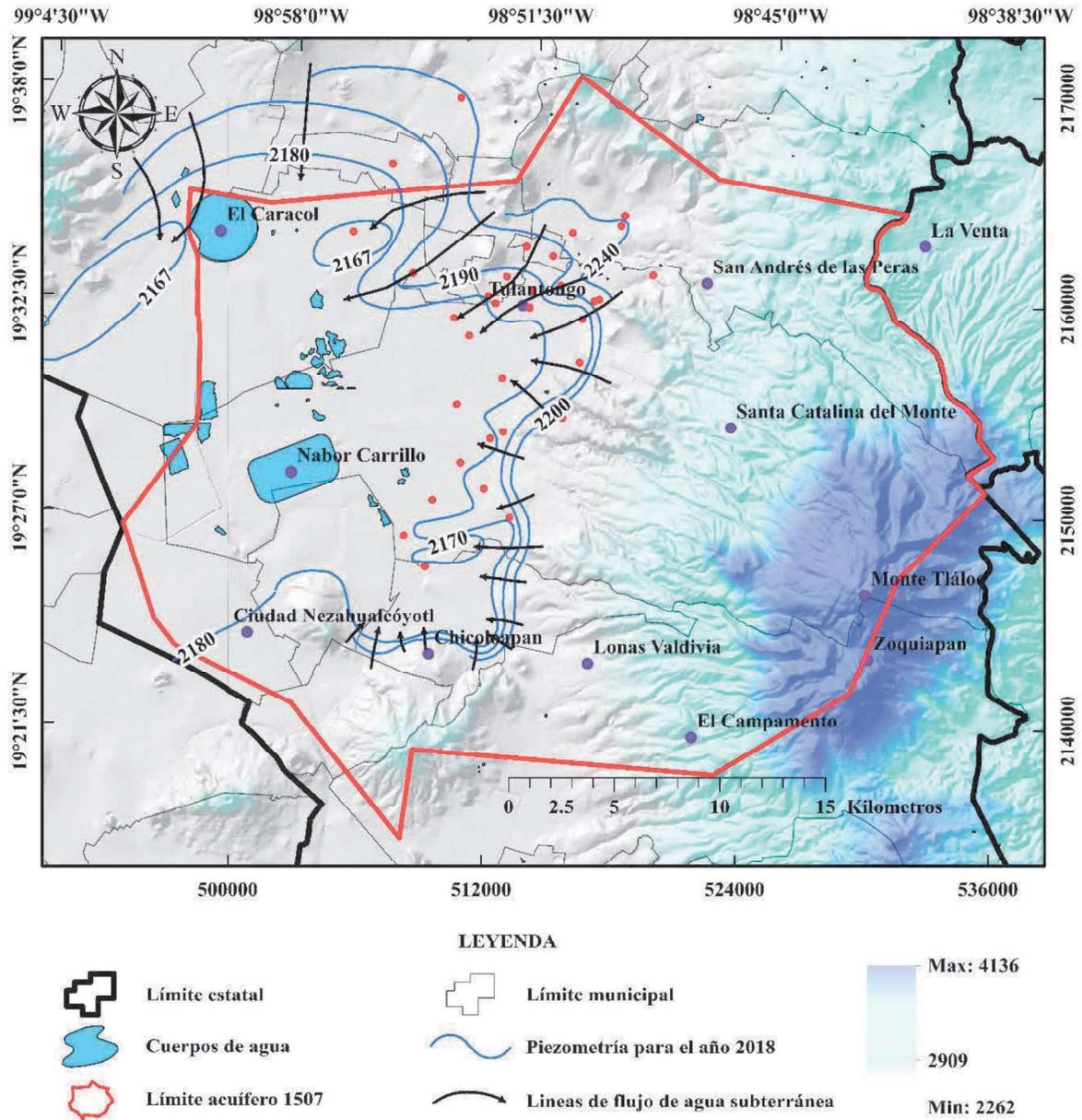


Figura 5.2. Mapa de piezometría para el año 2018.

Para comprender la evolución del nivel piezométrico en el acuífero, se estableció el periodo de 1974 al 2018 ya que es este lapso de tiempo en el que se cuenta, con información piezométrica, se seleccionaron los pozos de observación que contaron con información de la profundidad del nivel piezométrico para ambos años. Con un total de 18 pozos de observación se determinaron los abatimientos (S) (Tabla 5.4), encontrando los mayores abatimientos de más de 61 m en el municipio de Texcoco, seguido de 55 m nuevamente en

el municipio de Texcoco y Chicoloapan (Figura 5.3), siendo los municipios con mayor concentración de pozos de extracción y de la zona urbana.

Tabla 5.4. Valores de abatimientos del nivel del agua subterránea (m) en el periodo 2074 - 2018, en el Acuífero Texcoco.

Clave del pozo	Longitud X	Latitud Y	Elevación en m.s.n.m.	Profundidad del Nivel 1974	Profundidad del nivel 2018	Evolución del nivel 74-18 (S)
.B-273V	507830	2166924	2244	12.11	61.58	49.47
.C-953V	512686	2160290	2252	12	65.23	53.23
.EB-15	514299	2160088	2258	15.11	74.91	59.8
.EC-11	513227	2161552	2253	16	66.26	50.26
.ED-12	512356	2160643	2251	15	70.15	55.15
.EJ-18	516804	2159534	2275	43	90.65	47.65
.EJ-20	517369	2160384	2285	35	50.03	15.03
.EJ-51V	518650	2163988	2292	13.43	54.69	41.26
.EJ-72	518830	2164447	2293	18	34.83	16.83
.EJ-86	517603	2160466	2280	32.53	45.84	13.31
.EL-87V	515421	2162547	2263	19.62	65.82	46.2
.EM-03	514170	2162998	2258	19.5	64.51	45.01
.EN-83	511442	2158767	2246	16.2	73.33	57.13
.ER-14	511021	2152754	2248	11.58	73.18	61.6
.ER-87V	512431	2153896	2252	23	81.9	58.9
.ER-88	513050	2154210	2265	23	83.9	60.9
.ER-96	512131	2151504	2260	24.5	73.1	48.6
.ES-05V	513344	2150127	2296	57	111.78	54.78

Entre los pozos de observación en los que se presentaron los mayores abatimientos para el periodo 1974 al 2018 se tiene el pozo con identificador ER-14, localizado en el municipio de Texcoco, con un abatimiento de 61.6 m. En la Figura 5.3 se observa la evolución del nivel piezométrico en este pozo a lo largo del tiempo.

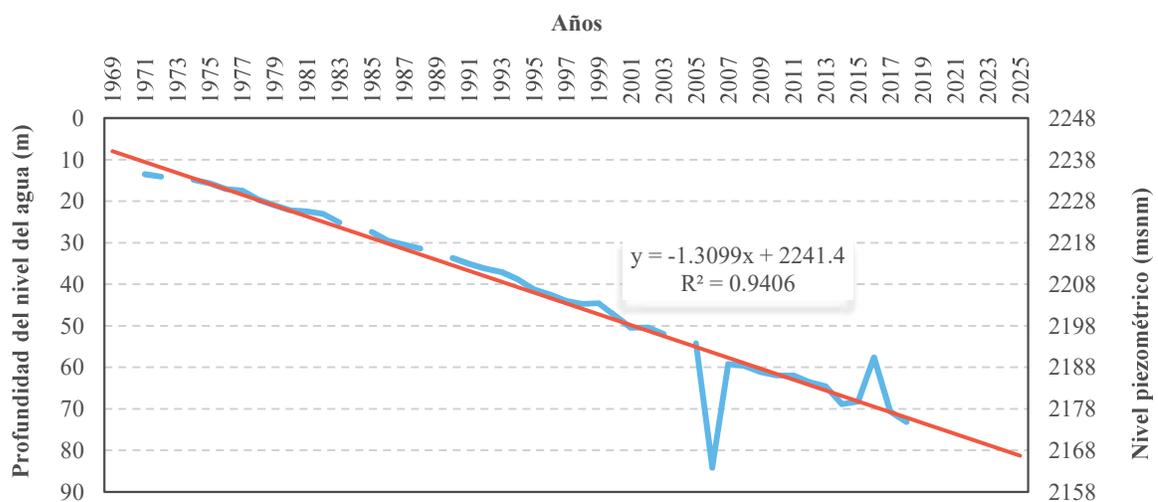


Figura 5.3. Evolución del nivel piezométrico del pozo de observación: ER-14.

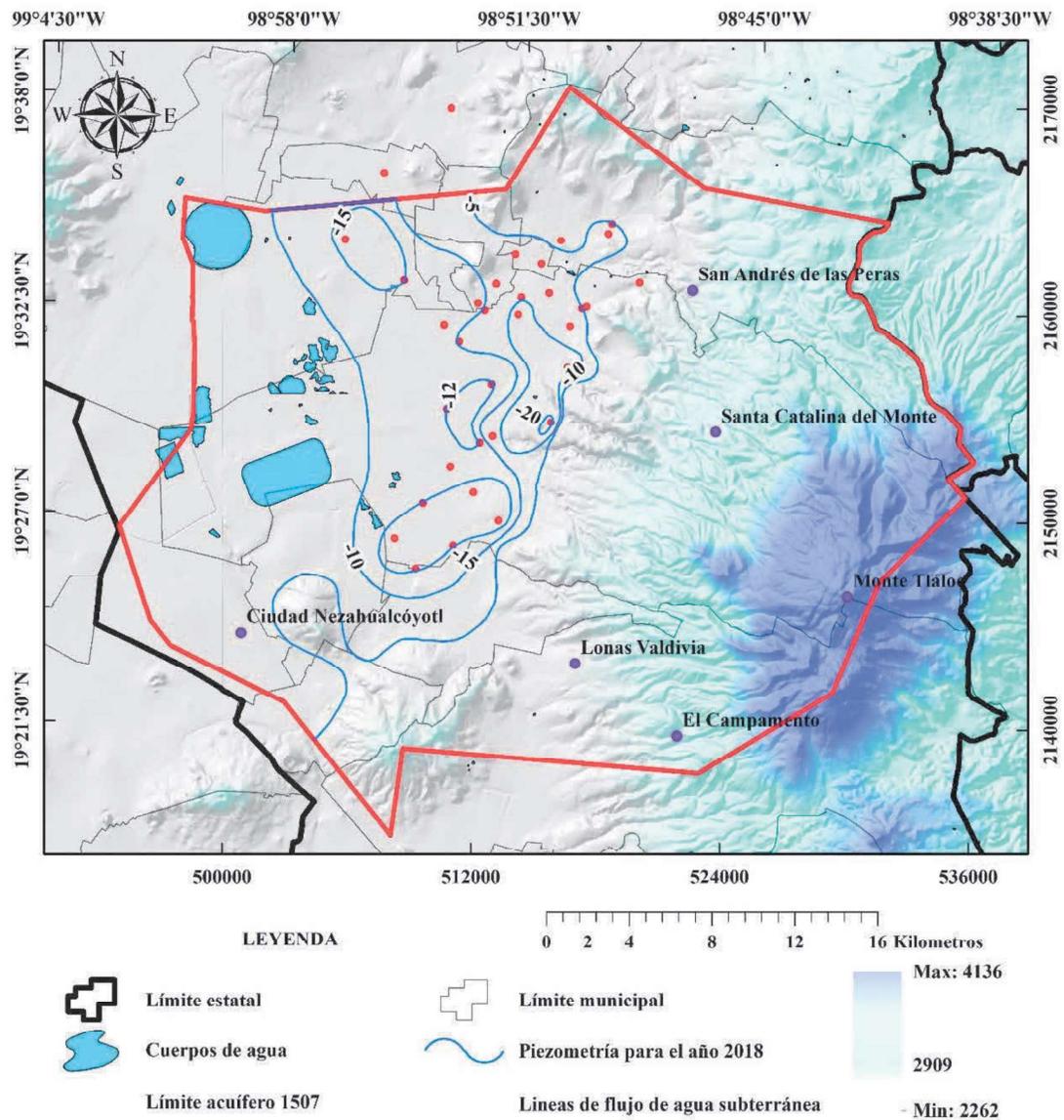


Figura 5.4. Mapa de evolución piezométrica para el periodo 2006-2018.

Otro pozo de observación que se encuentra en una situación similar es el pozo con identificador EB-15, el cual presenta abatimiento de 60.9 m para el periodo 1974 al 2018, este pozo también se encuentra en el municipio de Texcoco. En la figura 6.8 se puede apreciar la evolución del nivel piezométrico a lo largo del tiempo en este pozo.

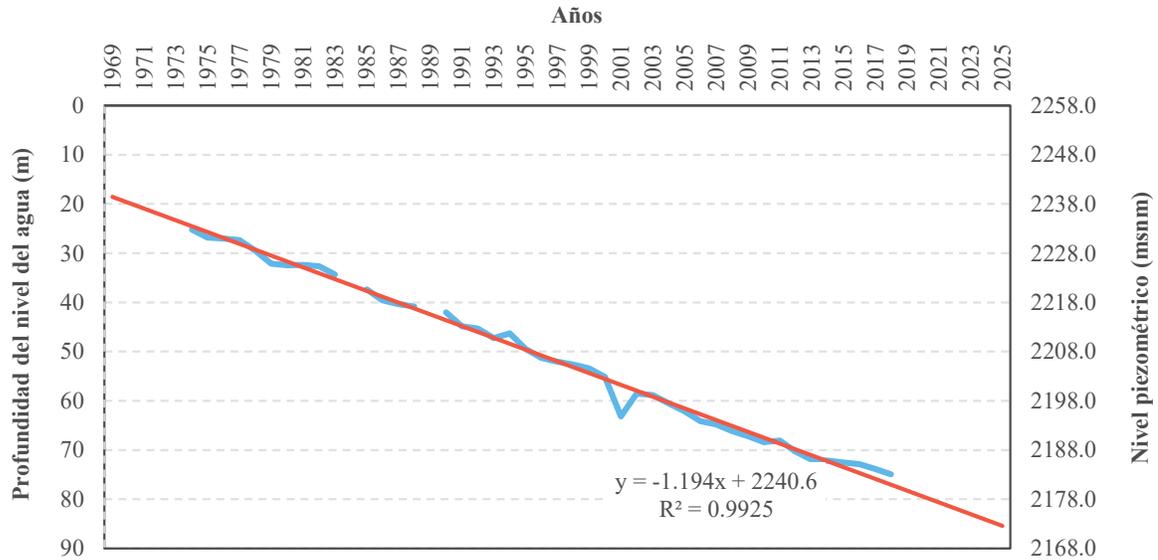


Figura 5.5. Evolución del nivel piezométrico del pozo de observación: EB-15.

Por otra parte, hay pozos de observación en los que para el periodo 1974 al 2018 han presentado muy poca evolución del nivel piezométrico es el caso del pozo con identificador EJ-86, en el que el abatimiento es de 13.3, la evolución de este pozo a través del tiempo se puede apreciar en la Figura 5.5.

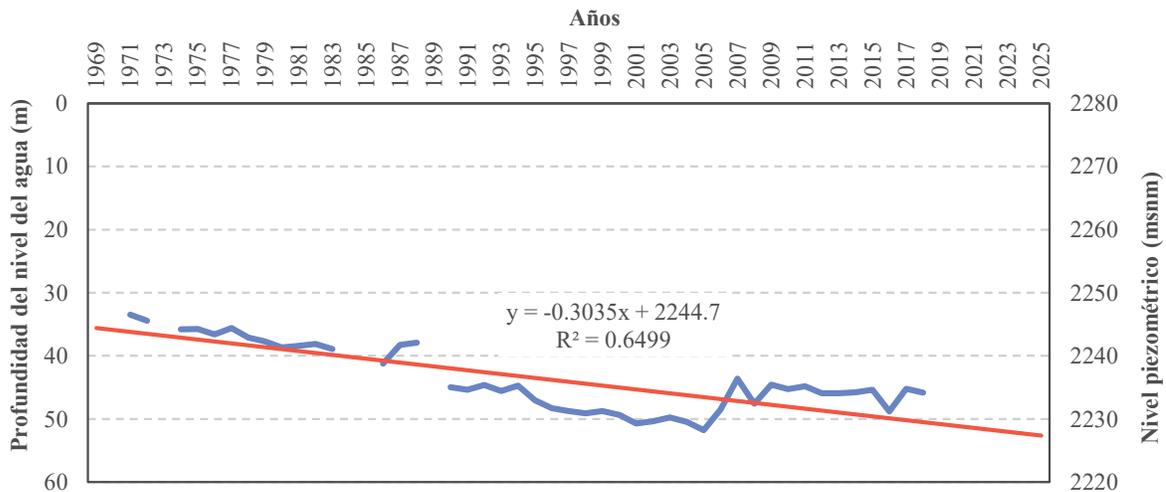


Figura 5.6. Evolución del nivel piezométrico del pozo de observación: EJ-86.

En el pozo con identificador EJ-20 se observa un caso similar al anterior con un abatimiento para este periodo de 15.3 m. La evolución piezométrica a lo largo del tiempo de este pozo se observa en la Figura 5.6.

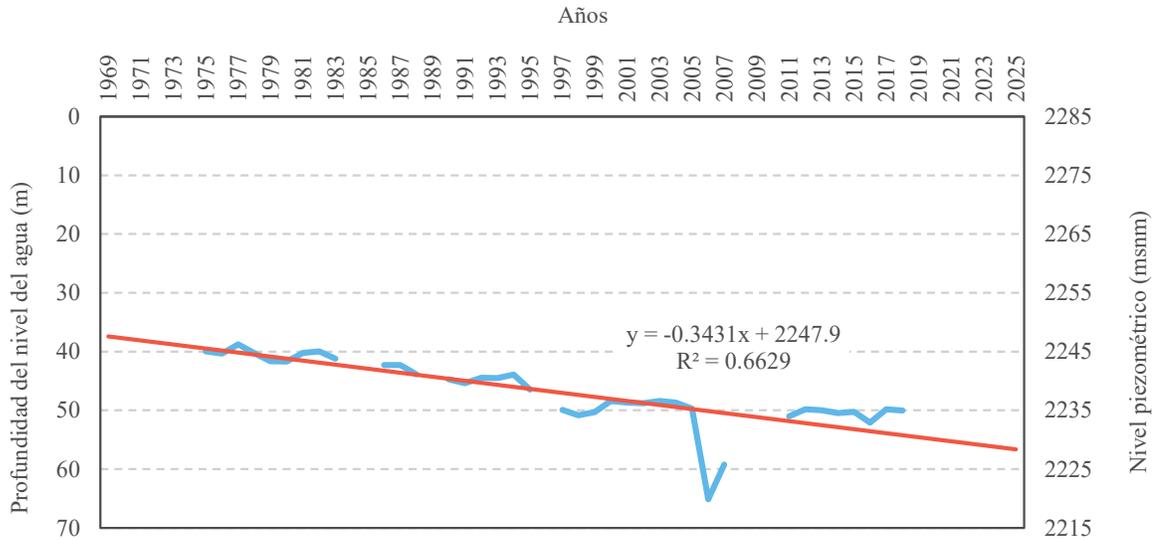


Figura 5.7. Evolución del nivel piezométrico del pozo de observación: EJ-20.

Es importante mencionar que los 2 últimos pozos mencionados también están localizados en el municipio de Texcoco.

### 5.2.3. Estimación de la recarga vertical de agua subterránea

La estimación de la recarga es uno de los procesos más complejos y con más incertidumbres para la implementación de un modelo numérico de y durante el transcurso de la investigación se trabajó en paralelo con otros investigadores que aportaron sus resultados para la presente. Para obtener la recarga vertical se tomaron en cuenta elementos como la distribución de la precipitación media anual, las características litológicas del área, la clasificación de los tipos de suelo con base en su textura, la pendiente del terreno y los distintos usos de suelo existentes en el área (Zaragoza, 2021).

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 del orden de los 5.3 hm<sup>3</sup>/año (CONAGUA, 2018).

### 5.2.4. Entradas y salidas horizontales al acuífero

El establecimiento de los principales mecanismos de recarga y descarga en el acuífero Texcoco se definieron con base en la configuración piezométrica y con base en el análisis del

censo de aprovechamientos realizado en el año 2006. De igual forma, se analizó la base de datos del REPDA para conocer la ubicación y el volumen concesionado de agua subterránea.

De acuerdo con lo establecido en la configuración del régimen de flujo elaborada en el presente estudio, las principales zonas de recarga se localizan en las zonas montañosas de la porción este y sur del área de estudio, presentándose de igual forma recarga producto de la precipitación en la planicie de Texcoco (CONAGUA, 2018).

Conforme al análisis piezométrico regional histórico del acuífero, existen entradas de forma horizontal por parte del acuífero de Cuautitlán-Pachuca en la parte norte (); mientras que al sur suroeste se observa ciertas salidas de flujo horizontal, sin estar muy bien definidas hacia el Valle de México, esto debido a la poca información de niveles en los pozos fuera del sistema.

### **5.2.5. Descarga de agua subterránea**

En lo que respecta a los mecanismos de descarga, con base en la información analizada la descarga principal del acuífero Texcoco se lleva a cabo mediante pozos de extracción y algunos manantiales ubicados en la porción este del acuífero. Los valores del REPDA fueron correlacionados y verificados con los datos del censo de aprovechamientos realizado por la CONAGUA en el año 2006 (CONAGUA, 2006a). El análisis de la información de estas fuentes permitió obtener datos importantes como la ubicación, caudales de extracción (192.5 h<sup>3</sup>/año) y uso de las principales fuentes de aprovechamiento localizadas en el acuífero.

#### **5.2.5.1. Extracción del agua subterránea con base en los datos de Censos de aprovechamientos**

La extracción de agua subterránea en el área del acuífero Texcoco ha presentado diferentes estimaciones debido a los cambios presentados en la delimitación de la poligonal que lo limita. De acuerdo con las estimaciones del censo, la delegación Iztapalapa perteneciente a la Ciudad de México, y el municipio de Ecatepec, en donde habitaban alrededor de dos millones de habitantes, registran el mayor volumen de extracción en el acuífero, destinado para el uso público-urbano, con un total aproximado de 230.5 y 80.57 hm<sup>3</sup>/año, respectivamente. Sin embargo, en el año 2003 de acuerdo con lo publicado en el Diario

Oficial de la Federación el 31 de enero del mismo año, los límites oficiales del acuífero se modificaron sustancialmente dejando fuera de la poligonal a la delegación Iztapalapa y al municipio de Ecatepec. Bajo este panorama, la Comisión Nacional del Agua llevó a cabo la actualización del Censo de Aprovechamientos en el Acuífero Texcoco en el año 2006.

En este censo, se registró un total de 552 aprovechamientos activos ubicados en el límite oficial (Figura 5.8), de los cuales 528 corresponden a pozos, 19 a manantiales y 5 a norias ubicadas en la porción norte del área de estudio, en las inmediaciones del municipio de Tepetlaoxtoc. Mediante estos aprovechamientos se extrae un volumen total de 183.0 hm<sup>3</sup>/año, del total de los volúmenes estimados, 172.5 hm<sup>3</sup>/año fueron extraídos por medio de pozo, 0.1 hm<sup>3</sup>/año por norias y 10.4 hm<sup>3</sup> provenientes de manantiales (CONAGUA, 2006a).

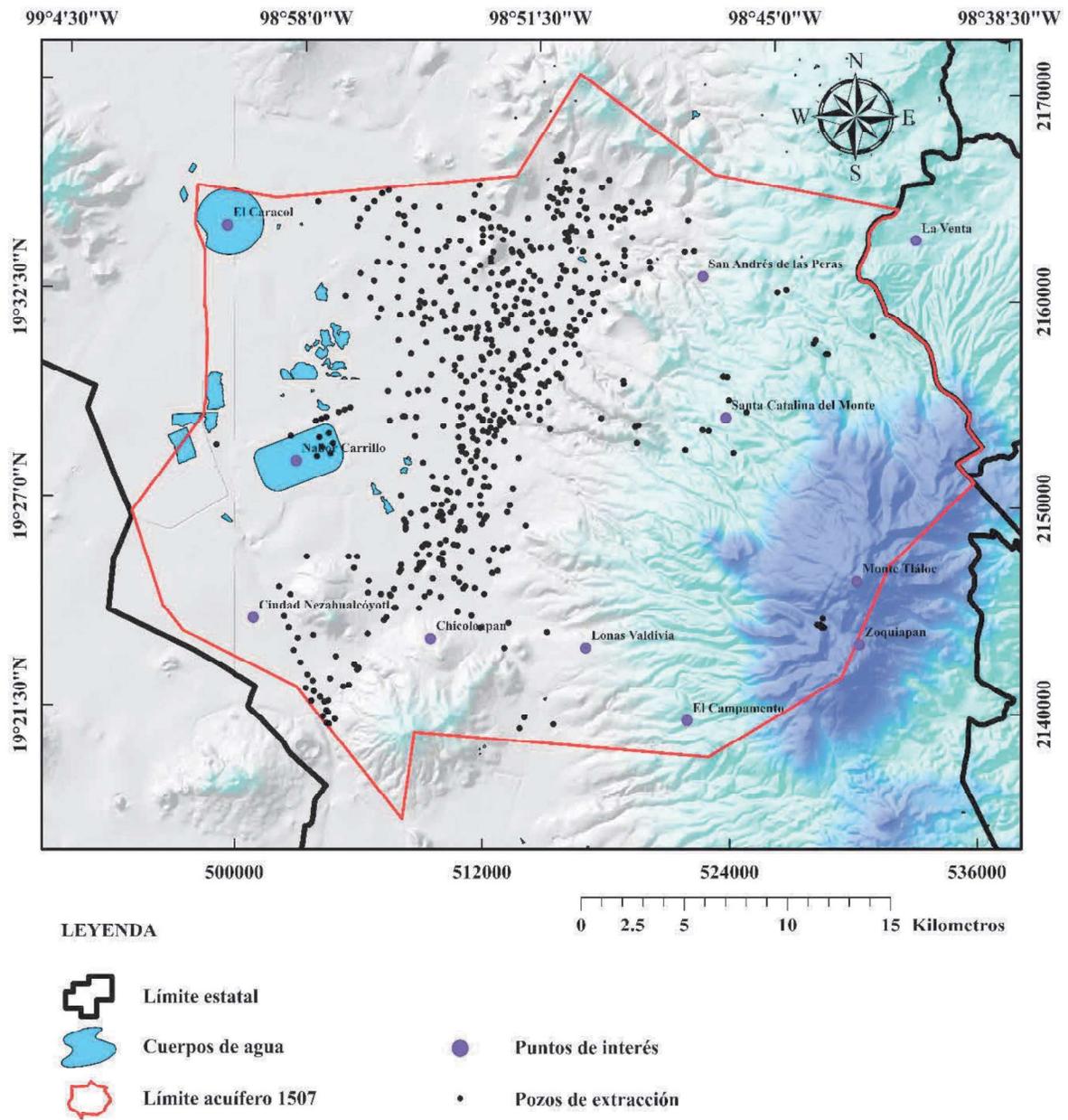


Figura 5.8. Distribución de los pozos registrados en el censo del año 2006. Fuente: CONAGUA, 2006.

Los mayores volúmenes de extracción se presentaron en el municipio de Texcoco y se llevó a cabo mediante 312 pozos localizados en el municipio, equivalentes al 50% de los aprovechamientos existentes en el acuífero. El volumen de extracción estimado coincide sensiblemente con el volumen concesionado en el REDPA, con un valor de 183.1 hm<sup>3</sup>/año y de 191 hm<sup>3</sup>/año, respectivamente, incluidos en ambos casos el volumen correspondiente a manantiales (CONAGUA, 2006a).

En una nueva modificación a la poligonal del acuífero en el año 2009 se incluyó una superficie adicional de los municipios de Tepetlaoxtoc, Texcoco, Atenco, Nezahualcóyotl y Ecatepec. Mientras que, en la parte sur, se disminuyó una superficie importante del municipio de Ixtapaluca. A pesar de las modificaciones realizadas en la poligonal del acuífero no se cuenta hasta la fecha con un censo de aprovechamientos que permita reflejar las condiciones actuales que prevalecen en el área de estudio.

#### **5.2.5.2. Volúmenes concesionados en el REPDA y usos principales del agua subterránea**

Para contar con una estimación aproximada del volumen de extracción actual en el acuífero, se llevó a cabo el análisis y ubicación de los aprovechamientos inscritos en el REPDA con fecha de corte al mes de octubre de 2019. Se seleccionaron 470 pozos asignados al acuífero Texcoco con un volumen concesionado de 110.98 hm<sup>3</sup>/año, y posteriormente al adicionar pozos de los acuíferos vecinos este valor ascendió a 513, con un volumen de 146.88 hm<sup>3</sup>/año.

El estudio de disponibilidad del 2018 de la CONGUA menciona un volumen de 246.57 hm<sup>3</sup>, muy similar a los 243.76 hm<sup>3</sup> de volumen concesionado para los 520 pozos de extracción pertenecientes al Acuífero Texcoco (CONAGUA, 2018a). La mayor densidad de los pozos se localiza principalmente a lo largo de la porción central de la planicie del acuífero en dirección noreste-suroeste, localizándose así mismo algunos pozos en la zona noroeste del área de estudio bordeando el piedemonte de la zona montañosa (Figura 5.9).

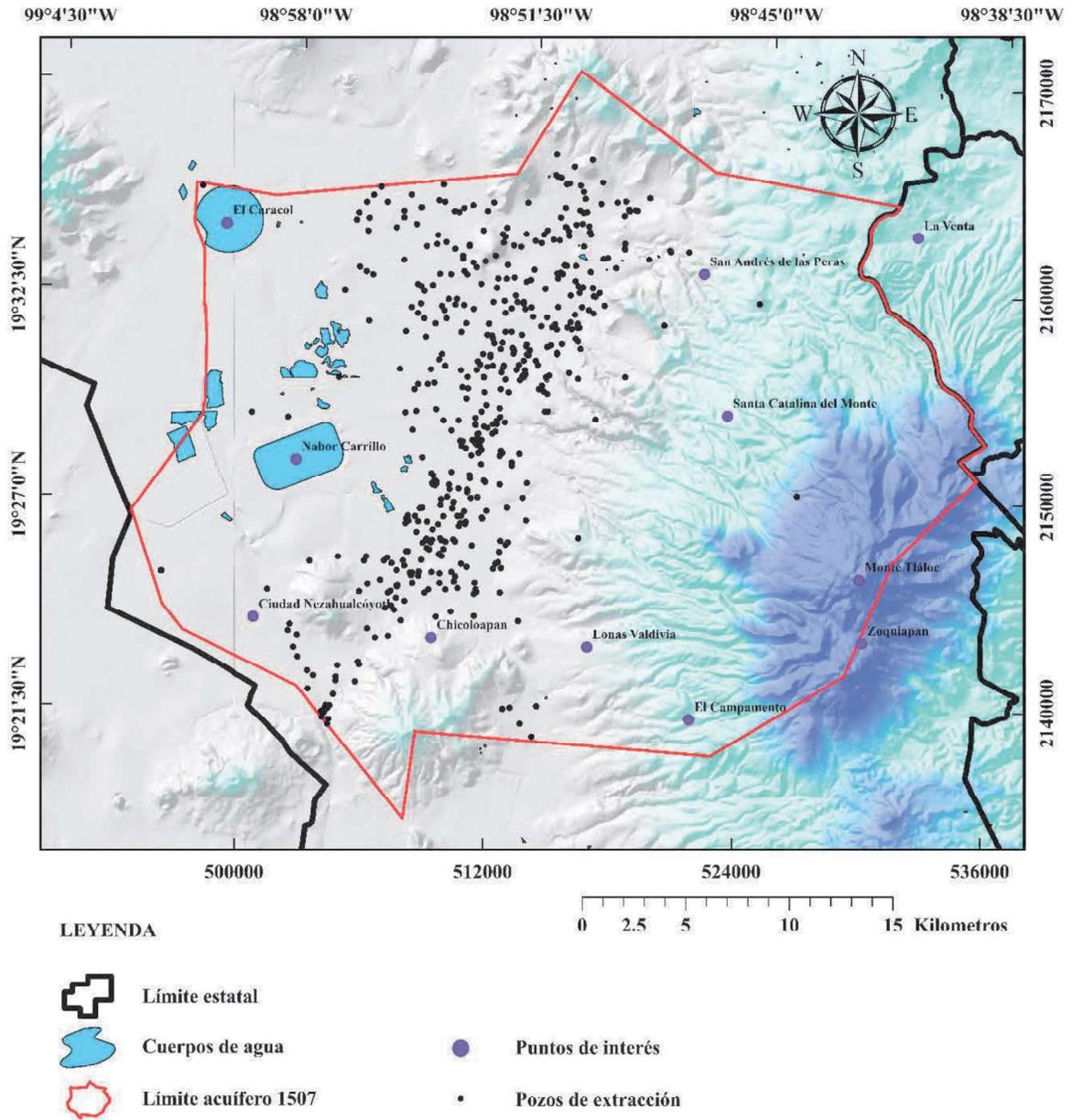


Figura 5.9. Pozos de extracción localizados en el Acuífero Texcoco. Fuente: Elaborado con base en los datos del REPDA, 2019.

Según los datos del REPDA 2019, el volumen correspondiente a manantiales representa 8.81 hm<sup>3</sup>/año.

### 5.2.6. Modelo conceptual hidrogeológico del acuífero Texcoco

Con base en la síntesis de toda la información precedente (definición de las unidades hidroestratigráficas, régimen de flujo, propiedades hidráulicas y balance hidrogeológico) se

ha definido un esquema tridimensional que representa, de manera sintetizada, el funcionamiento hidrogeológico del Acuífero de Texcoco. Estableciéndose y cuantificando elementos como, las entradas de flujo horizontales; las entradas por recarga vertical por precipitación, los volúmenes de recarga inducida; las descargas naturales; la descarga por bombeo; así como los valores y la distribución de parámetros hidráulicos. El modelo conceptual se muestra en la Figura 5.10. En la Tabla 5.5 se pueden consultar los elementos del balance de aguas subterráneas determinado para el acuífero Texcoco considerando un área de balance de 418 km<sup>2</sup>.

Tabla 5.5. Elementos de balance del modelo Conceptual Hidrogeológico. Información modificada de CONAGUA 2018 .

Elementos del balance	Hm <sup>3</sup> anuales 2018
Recarga vertical por precipitación	104.04
Recarga por flujo horizontal	43.23
Recarga inducida	5.26
Extracción	183.03
Descarga natural comprometida	10.4
Cambio de almacenamiento	55.55
Salida por flujo horizontal	0.73

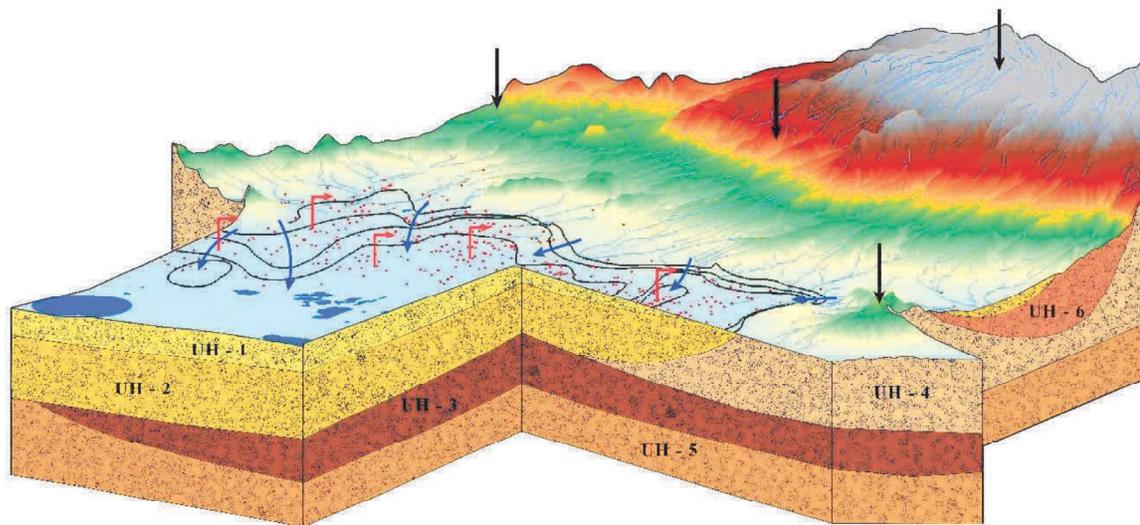


Figura 5.10. Modelo conceptual hidrogeológico del acuífero Texcoco. Elaboración propia.

### **5.3. Modelación numérica del flujo de agua subterránea del acuífero Texcoco**

#### **5.3.1. Dominio del modelo y discretización**

##### **5.3.1.1. Dominio del modelo**

Con base en los resultados obtenidos en el modelo conceptual hidrogeológico, se definió el dominio del modelo conforme al análisis del comportamiento hidrodinámico de la zona de estudio y los diversos factores que influyeron en el modelo conceptual hidrogeológico. El dominio se localiza en la parte central de la zona de estudio que corresponde principalmente al valle, donde se concentra la mayoría de los pozos con importantes volúmenes de extracción, donde se presenta abatimientos de los varios metros, los cuales han propiciado ciertas afectaciones ambientales, disminución del nivel en cuerpos de aguas, así como agrietamiento de suelo y subsidencias locales en gran parte de la zona.

Además, se considera esta zona debido a la información de pozos con datos de bombeo y cortes litológicos que determinan las unidades hidroestratigráficas de la zona, así como las conductividades de la región. Por tanto, la mayor cantidad de información necesaria para la modelación numérica se encuentra en esta zona. El dominio del modelo propuesto para la modelación numérica se muestra en la Figura 5.11.

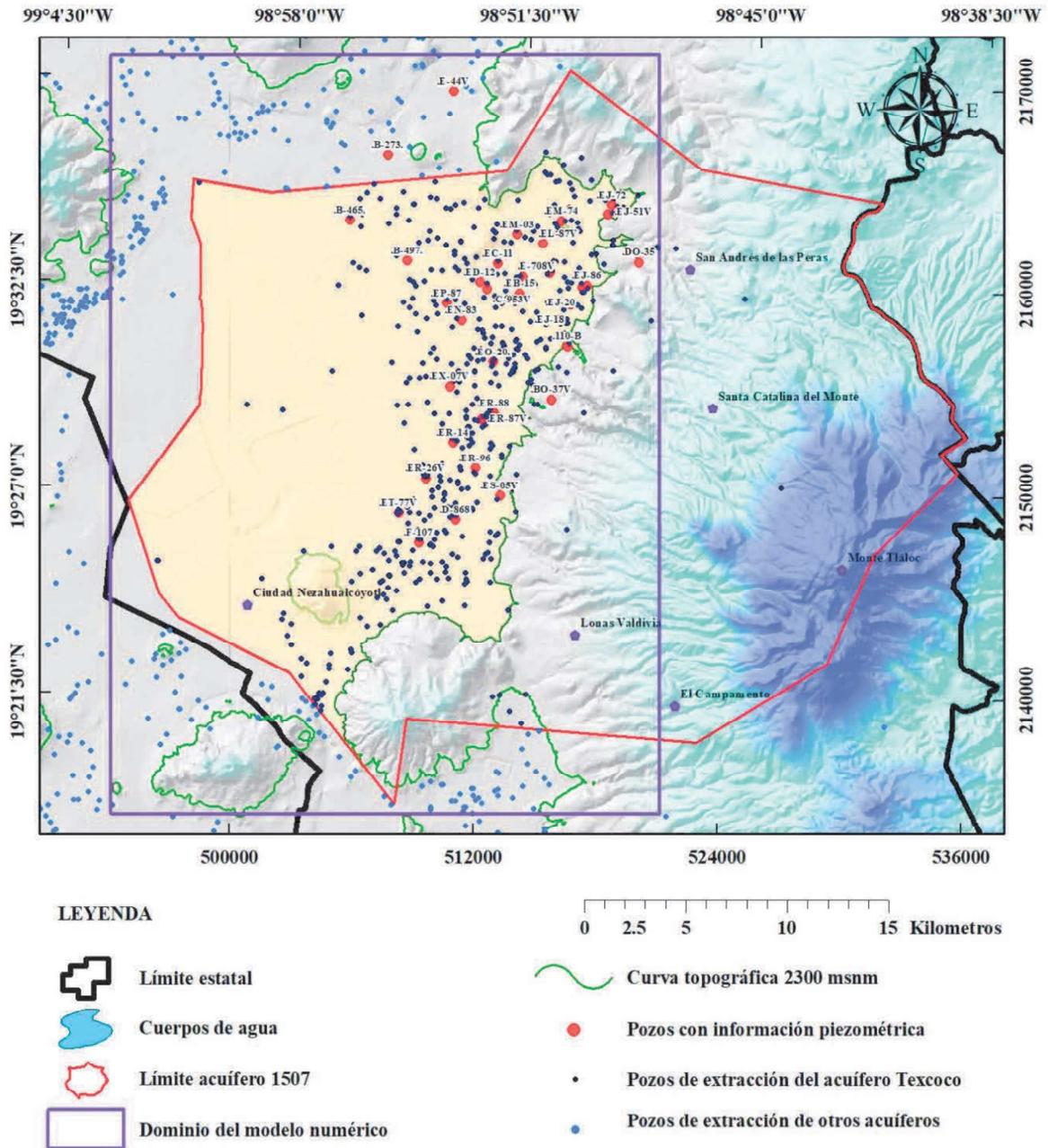


Figura 5.11. Dominio del modelo en el acuífero Texcoco.

En las zonas aledañas al valle, por las regiones montañosas se aprecian ciertos pozos que se distribuyen de manera dispersa, estos cuentan con poca información, por lo que no se consideran para el dominio del modelo, sin embargo, es importante esta zona debido a que se considera como una zona de aportación de recarga al acuífero principal.

Por lo tanto, el dominio del modelo, en su forma horizontal tiene coordenadas  $X_{\min}$ : 494 911,  $X_{\max}$ : 520 624,  $Y_{\min}$ : 2 134 770 y  $Y_{\max}$ : 2 171 317, comprende totalmente la planicie de valle del acuífero y se extiende hasta el pie de montaña delimitado por la cota topográfica 2 300 msnm.

En la zona del dominio del modelo se encuentran ubicados más del 95 % de los pozos de extracción del área, la mayoría pertenecen al acuífero 1507-Texcoco (pozos de color negro en la Figura 5.12) y otra pequeña porción a pozos de los acuíferos 0901-Zona Metropolitana de la Ciudad de México y 1508-Cuautitlán-Pachuca (pozos de color azul en la Figura 5.12 y que representan los pozos que pertenecen a otros acuíferos). No se seleccionó más allá del pie de monte, debido a que no se cuenta con suficiente información de conductividad y cargas hidráulicas, lo cual representa siempre un factor de incertidumbre en los problemas de la modelación (Forster y Smith, 1988).

#### **5.3.1.2. Discretización horizontal**

Con base en el dominio del modelo establecido y teniendo en cuenta las recomendaciones bibliográficas actuales en cuanto a densidad de mallado versus tiempo y complejidad de cómputo (Jeff et al., 2021), se realizó una discretización horizontal de la zona de estudio definida por una malla de 241 columnas y 288 filas. Las filas y columnas definidas se encuentran espaciadas a 100 m, formando cuadrados de 100 x 100 m (de ahora en adelante se llamará celdas a cada uno de estos cuadrados), con un área de 1 hectárea cada uno. En total dentro del área de modelación se encuentran 69408 celdas de las cuales el 59.5% pertenecen a celdas activas (celdas de color blanco en la imagen) y el resto a celdas inactivas (celdas de color verde en la imagen), que son las que no considerará el modelo a la hora de realizar la simulación del flujo (Figura 5.13).

Debido a la ubicación geográfica y la distribución espacial de los límites del acuífero se decidió ubicar las columnas del mallado con dirección Norte-Sur y las filas perpendiculares a estas permitiendo así que no fuera necesario darle alguna rotación al modelo para su representación espacial en imágenes, figuras y planos. Debido a la densidad de mallado seleccionada se dificultó la tarea de realizar algunos mapas y que presentaran la mayor calidad en cuanto a visibilidad.

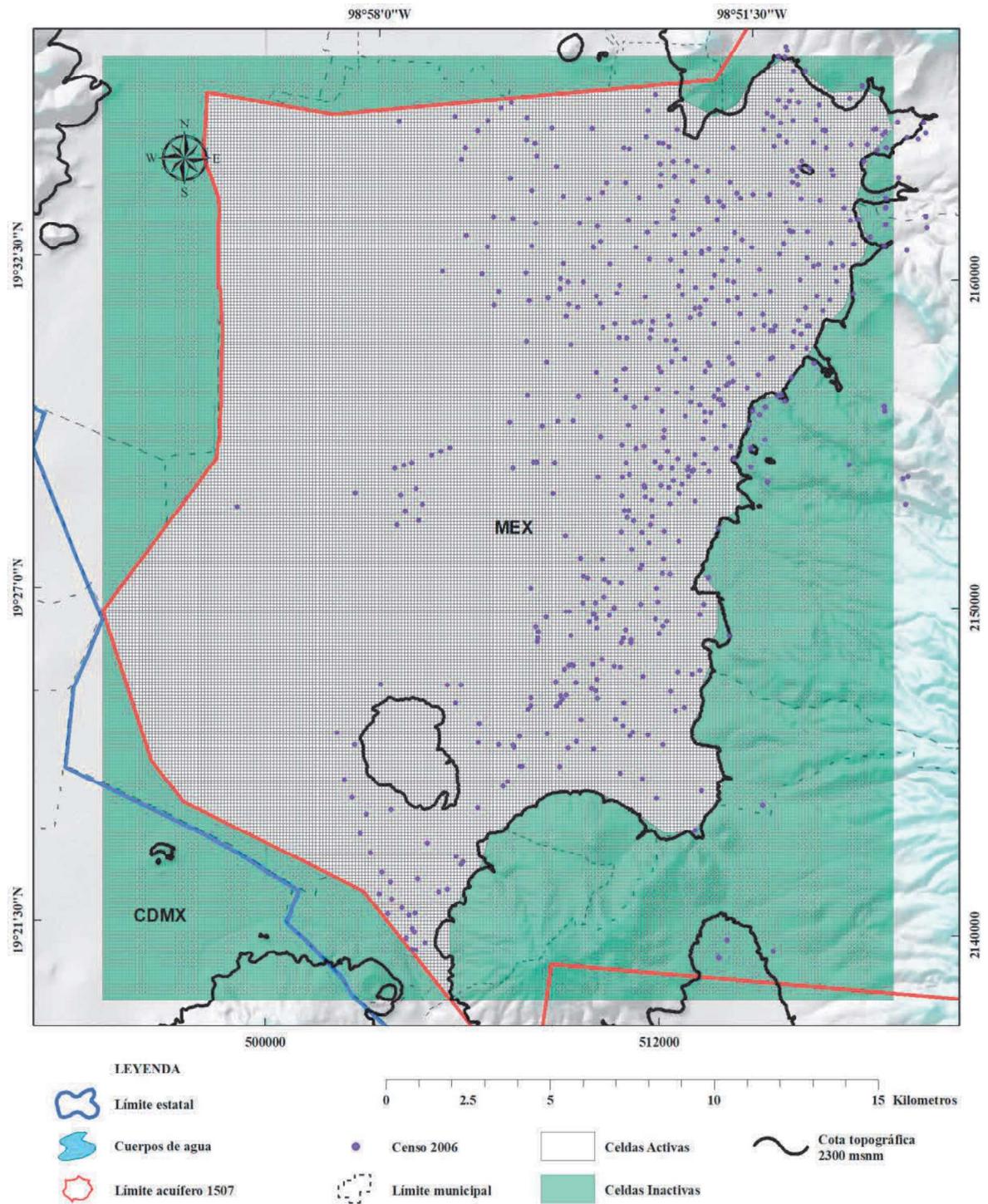


Figura 5.12. Dominio del modelo y discretización horizontal.

### 5.3.1.3. Discretización vertical

Por otro lado, la discretización de forma vertical se compone de 4 capas diferentes, pero para representar de forma más aproximada la realidad el medio físico, las dos capas intermedias que corresponden a los Depósitos Aluviales y Depósitos Piroclásticos y Clásticos Aluviales del Plioceno se decidió dividirlos en tres capas cada una, dando un total de 8 capas para el modelo (Tabla 5.6). Esta distribución además permite aproximar las entradas laterales de los acuíferos vecinos, principalmente del acuífero Cuautitlán-Pachuca que se encuentra en la parte norte del área.

Tabla 5.6. Distribución de las capas del modelo numérico de flujo del acuífero Texcoco.

Unidad Hidrogeológica	Geología	Subcapas
UH – 1	Qla	1
UH – 2	Qal	3
UH – 3	Qpv	3
UH – 4	Tpv	-
UH – 5	Tmv/Tomv	1
UH – 6	Tpvc	-
	Total	8

Las figuras 5.13 y 5.14 muestra la discretización vertical de la fila 109 y la columna 56 del dominio del modelo.

Esta fila y columna fueron seleccionadas porque son las más cercanas a las secciones geológicas que se han presentado durante el transcurso de la investigación, por lo que son las que mejor las representan.

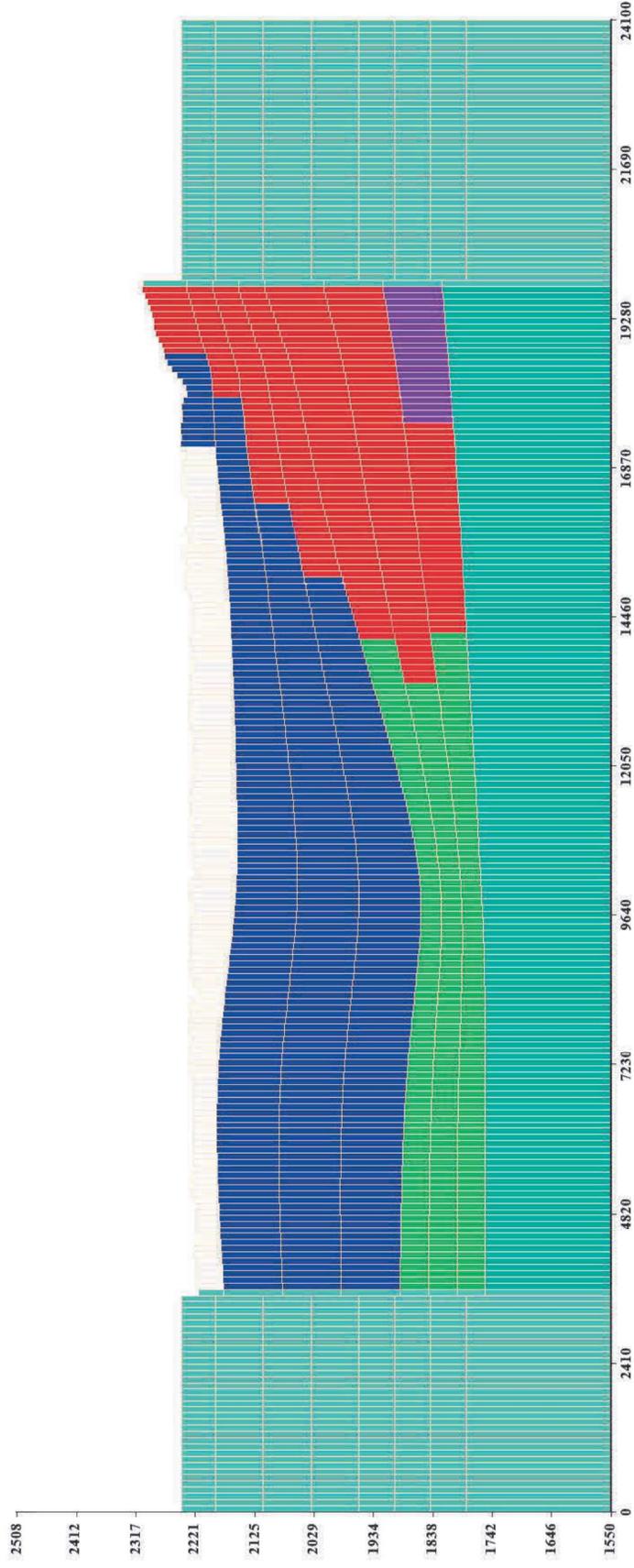


Figura 5.13. Discretización vertical del dominio del modelo representado en Visual Modflow Flex (fila 109).

En las figuras 5.13 y 5.14 se representan las secciones de para una fila y una columna del modelo numérico de flujo, en estas los colores representan las capas para cada unidad hidrogeológica establecida con anterioridad en la Tabla 5.6.

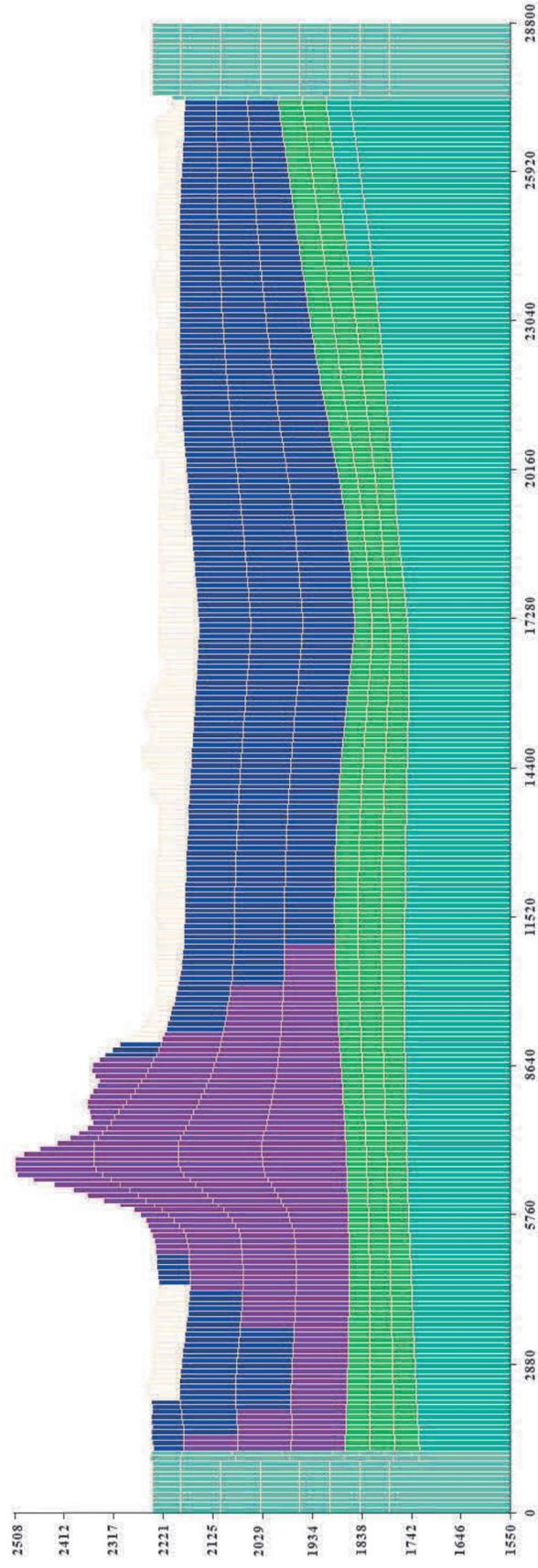


Figura 5.14. Discretización vertical del dominio del modelo representado en Visual Modflow Flex (columna 97).

#### 5.3.1.4. Discretización temporal

El periodo de tiempo seleccionado para la calibración del modelo del acuífero es de 12 años con un periodo que va desde 2006 al 2018. La razón de ello es debido a que es en este tiempo en donde se cuenta con la mayor cantidad de datos de extracciones del acuífero Texcoco, además de la información proporcionada por el censo llevado a cabo en 2006 para la realización del modelo numérico de dicho año. Se realizó una simulación en estado transitorio con pasos de tiempo anuales y que resulta un enfoque más adecuado y una alternativa más confiable para la reproducción y análisis del comportamiento del sistema bajo distintos periodos de interés.

#### 5.3.2. Parámetros hidrodinámicos del acuífero

Conforme a la información de las pruebas de bombeo de pozos en la zona y los modelos del año 2006 y 2019 se determinó la distribución espacial de forma horizontal, definiéndose valores para cada una de las unidades hidroestratigráficas definidas en la investigación. Los valores de conductividad hidráulica varían en el orden de  $10^{-3}$  m/d hasta  $10^1$  m/d y se pueden consultar en la Tabla 5.7 y en la Figura 5.15. Se asume que la conductividad hidráulica horizontal es un parámetro isótropo, por lo que las conductividades en X e Y tiene el mismo valor. Mientras que la condición en el sentido vertical se adoptó por tener una relación de 1 a 10 con respecto a la conductividad en X e Y.

**Tabla 5.7. Conductividad por unidad hidroestratigráfica**

UNIDAD	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]
UH-1	0.0121	0.0121	0.0012
UH-2	3.0240	3.0240	0.3024
UH-3	0.4320	0.4320	0.04320
UH-4	3.4560	3.4560	0.34560
UH-5	0.0017	0.0017	0.00017
UH-6	6.0480	6.0480	0.60480

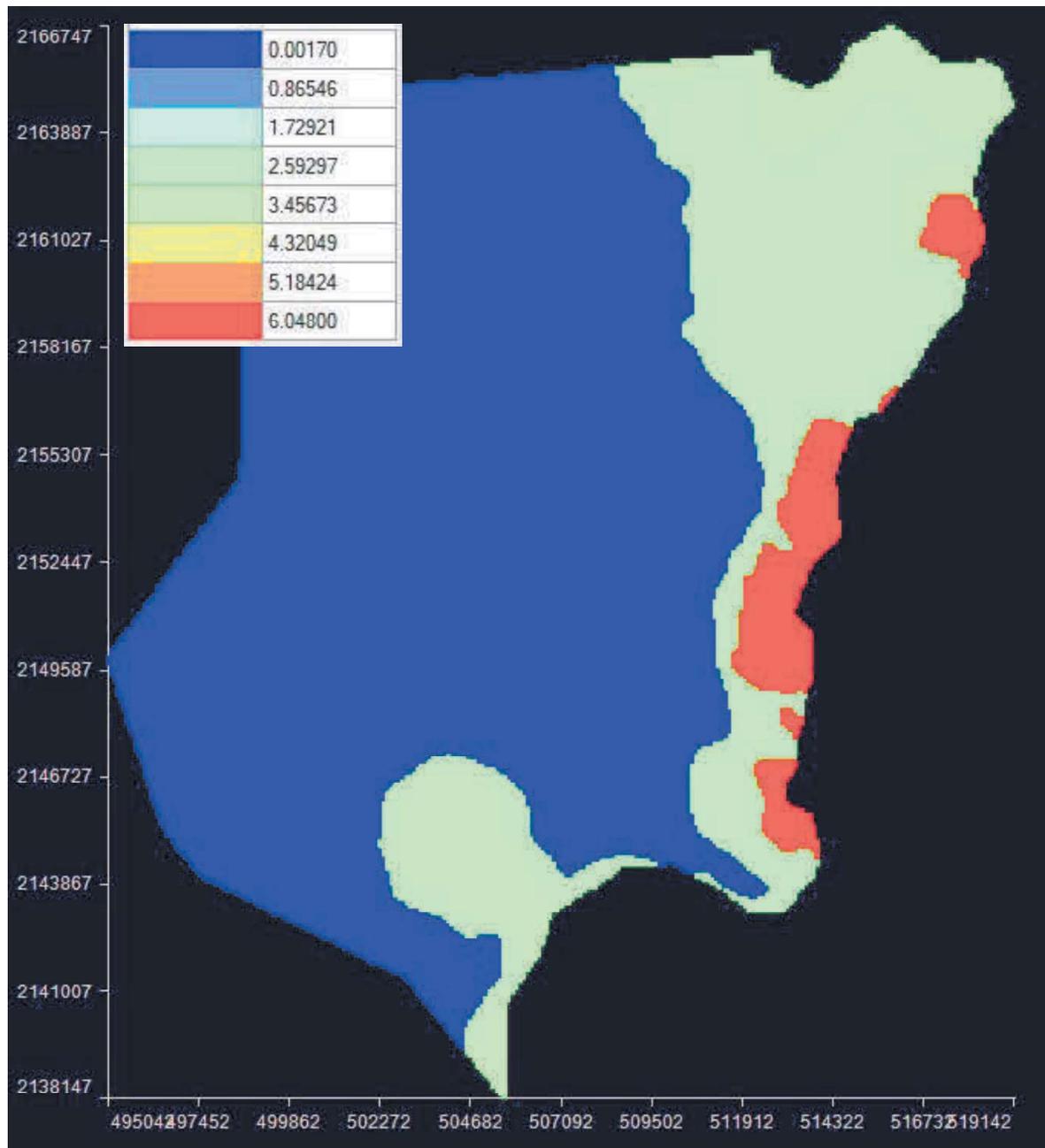


Figura 5.15. Distribución espacial de la conductividad hidráulica  $K_x$  y  $K_y$  en la capa 1 del modelo.

Tabla 5.8. Coeficientes de almacenamiento y porosidades

UNIDAD	Ss [1/m]	Sy[]	Eff. Por[]	Tot. Por[]
UH-1	0.00001	0.0300	0.15	0.3
UH-2	0.00001	0.1500	0.15	0.15
UH-3	0.00001	0.1200	0.15	0.15
UH-4	0.00001	0.1500	0.15	0.04
UH-5	0.00001	0.1500	0.29	0.15
UH-6	0.00001	0.1500	0.25	0.25

Por otro lado, pero de igual forma que las pruebas de bombeo, los coeficientes de almacenamiento se obtuvieron de datos de la bibliografía y los modelos desarrollados con anterioridad (Tabla 5.9 y Figura 5.16).

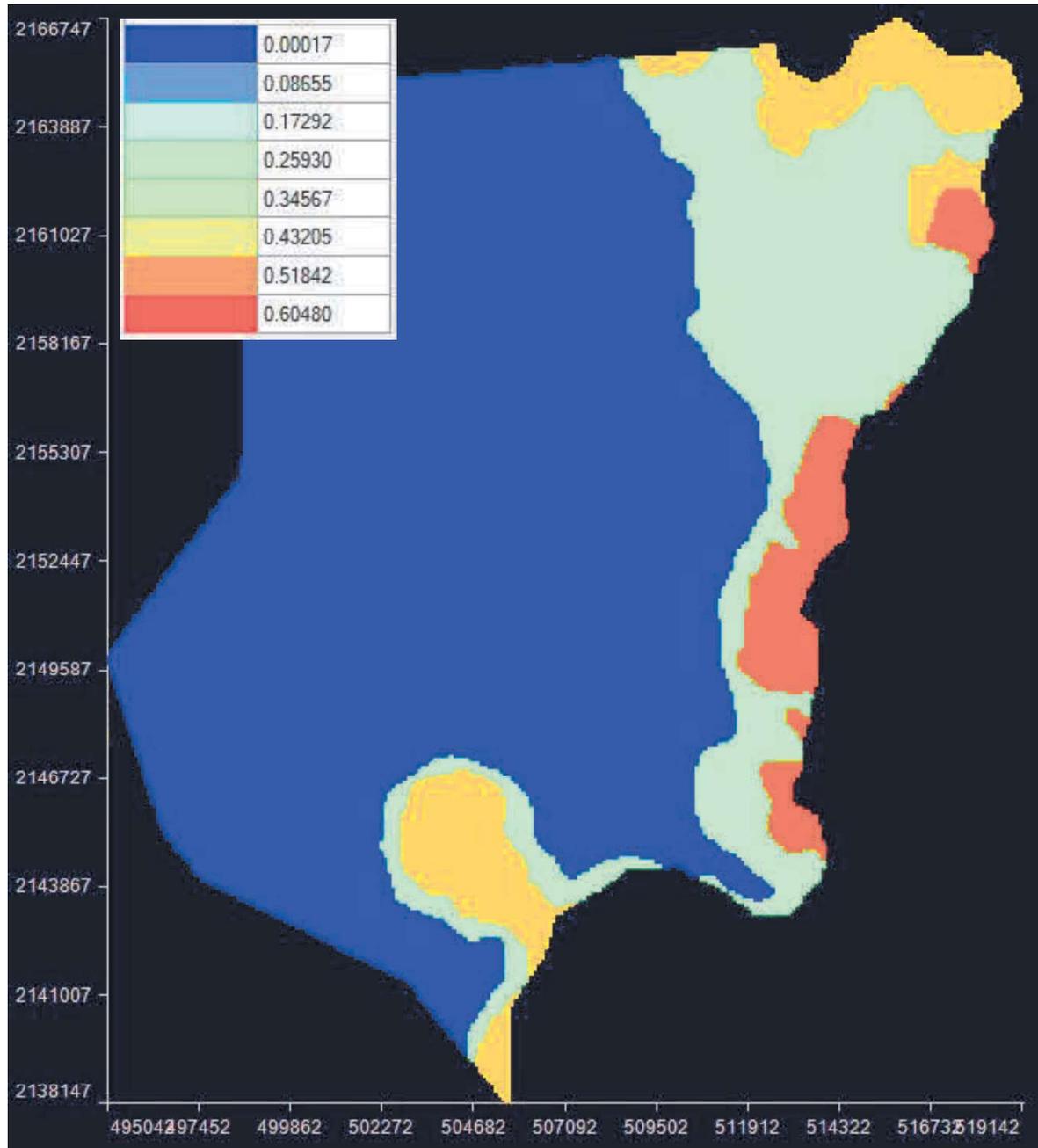


Figura 5.16. Distribución espacial de la conductividad hidráulica  $K_z$  en la capa 1 del modelo.

### 5.3.3. Condiciones de frontera

El establecimiento de las condiciones de frontera a lo largo de todo el borde del dominio del flujo, se basaron en los criterios planteados en la metodología propuesta, por lo que se definieron 3 condiciones de frontera.

- Se identificó la contribución de entradas laterales, en la parte norte del acuífero, con la aportación del flujo que viene del acuífero Cuautitlán Pachuca ( $31.7 \text{ hm}^3/\text{año}$ ) (CONAGUA, 2018) y observó la existencia de salidas al suroeste hacia la Ciudad de México, por lo que se determinó colocar la condición de Frontera de flujo constante (Dirichlet) en estos sitios.
- Se determinó la recarga vertical por lluvia en el Valle para el periodo 2006 – 2018, por lo que se definió en la capa superior del dominio del modelo (Figura 5.16) la condición de Frontera de flujo especificado (Neuman).

Por las características de la zona lacustre se le asignó a la zona del acuitardo una recarga vertical diferente a la del resto del acuífero y que representara la recarga por goteo de este al acuífero. En la Figura 5.17 se puede ver la distribución espacial de las zonas de recargas establecidas. Según Lesser y González, 2005, la recarga por goteo de todo el acuitardo del valle de México para el año 2003 es de  $125.16 \text{ hm}^3$  por lo que considerando que el goteo ocurre de forma equivalente para toda el área de acuitardo, la porción correspondiente al acuífero Texcoco tendría una recarga vertical de  $18.14 \text{ hm}^3/\text{año}$ , lo que representa una precipitación de  $62.58 \text{ mm}/\text{m}^2$  distribuida espacialmente.

Para la simulación en estado inicial se tomaron todas las fronteras del acuífero como de carga constante para asegurar que el modelo represente correctamente el régimen de flujo. Sin embargo para la simulación del modelo en estado transitorio se decidió colocar la frontera de la parte norte correspondiente a la de entrada de flujo del acuífero Cuautitlán-Pachuca y la de la parte este que representa la entrada de flujo horizontal de la parte montañosa como fronteras de carga variable y con valor de entrada para el año 2018 de  $81.3 \text{ h}^3$ .

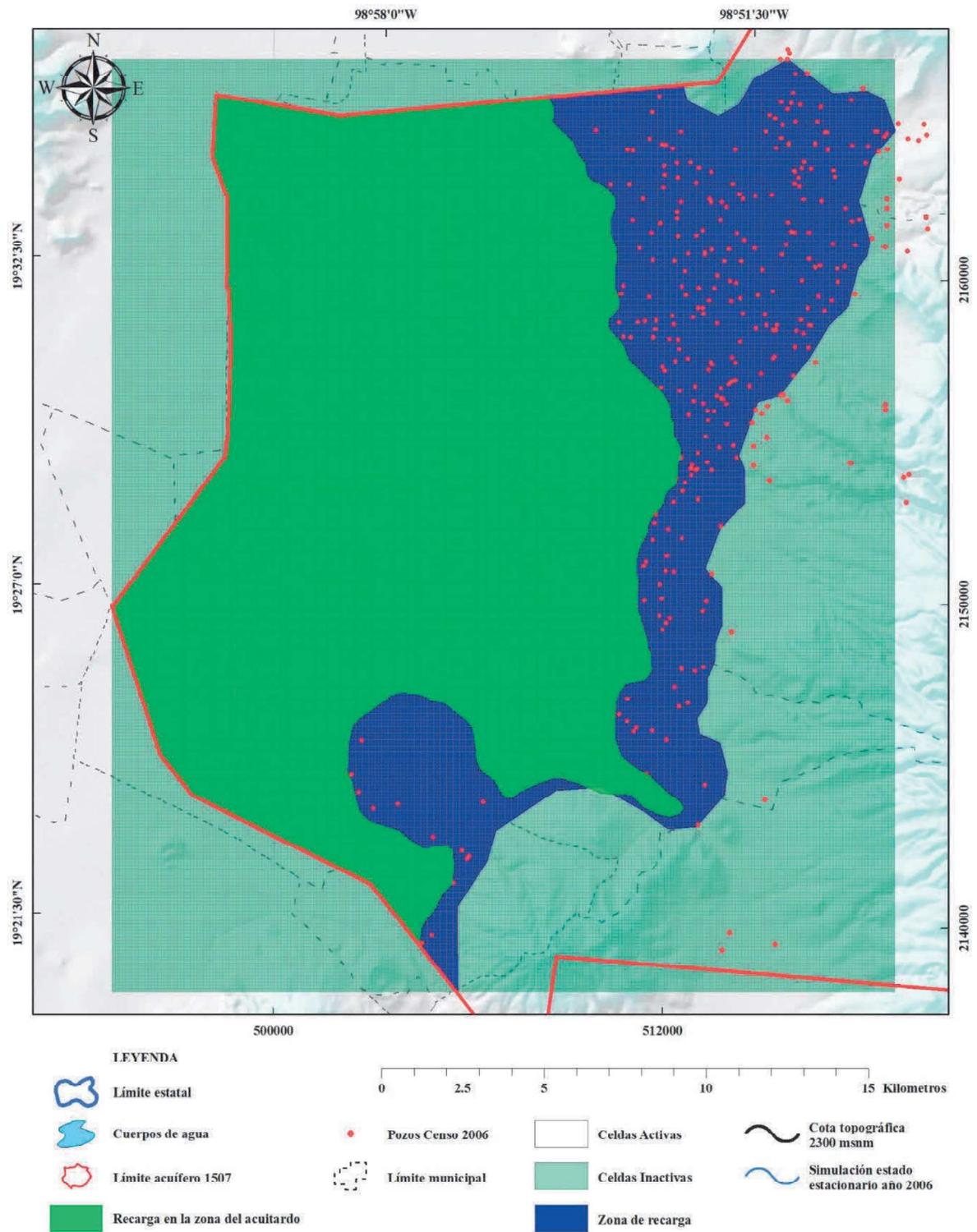


Figura 5.17. Distribución espacial de la recarga del modelo numérico de flujo.

#### **5.3.4. Condiciones iniciales**

Durante el desarrollo de la metodología de la investigación se llegó a la conclusión de que no se podía realizar una simulación de en estado estacionario porque durante el periodo de 1974 al 2018 los registros piezométricos presentan tasas lineales de abatimiento lo que demuestra que desde que se cuentan con registros el acuífero nunca ha estado en equilibrio, sino que siempre ha estado en constante descenso, por lo que no se cuenta con condiciones iniciales reales para este.

Anderson et al. (2015) plantea que en casos como en el que nos encontramos existen técnicas y métodos para ayudarnos a determinar un tiempo en el cual el acuífero pueda comportarse como en equilibrio, es decir que este en estado estacionario. Las técnicas que menciona Anderson son complejas y requieren gran cantidad de datos e información. Como una simulación en estado estacionario no tiene interés para la presente investigación, pero si ayudará a comprobar que el modelo funciona correctamente se decidió utilizar como condición inicial los niveles piezométricos del propio año 2006 y que se presentaron anteriormente.

#### **5.3.5. Bombeos y extracción**

A la hora de trabajar con los pozos y bombeos en Visual MODFLOW Flex hay que tener bien en cuenta que es lo que vamos a hacer con los datos porque depende de ello las variables que debemos introducirle a la tabla de datos. En la investigación lo primero que se tuvo que hacer a la hora de importar los pozos de extracción fue hacer una correlación entre varias bases de datos que se tenían, algunas de estas fueron; el REPDA, 2019; el censo,2006; la base de datos de piezometría de CONAGUA entre otros. Esta tarea tomo algo de tiempo porque algunas de las bases de datos eran extensas y comprobar esto tomó su tiempo.

Finalmente, con la información procesada se procedió a crea un documento con un formato que el software Visual MODFLOW Flex entendiera (en el anexo 1 de la investigación se puede consultar la base de datos resultante).

Del censo proporcionado por el CONAGUA, se tiene registrado un total de 552 pozos de extracción, de los cuales 550 se encuentran dentro del límite físico del acuífero, definido para

finde de este estudio, mientras que para el dominio del modelo son 476 pozos los que se encuentran dentro, lo que representa un 86.2% del volumen registrado en la actualización de la disponibilidad del acuífero.

Cabe aclarar que el límite oficial tiene una superficie de 934 km<sup>2</sup>, mientras que el área del límite del dominio es de 412 km<sup>2</sup>, es decir, se está extrayendo la mayor cantidad de agua de menos de la mitad del acuífero oficial.

En términos de la modelación numérica del flujo subterráneo, se han incorporado actualmente un 61.8% (476 pozos), principalmente los que registran una extracción intensiva importante. Cabe resaltar que, debido al tamaño de la celda, algunos pozos casi ningún pozo cae en una misma celda con otro.

### **5.3.5. Simulación inicial de flujo de aguas subterráneas para el año 2006**

Una vez asignados los parámetros hidráulicos y especificadas las condiciones de frontera, se llevó a cabo la simulación en estado estacionario para el año 2006, estableciendo como condición inicial, la configuración piezométrica del año 2006. Luego de varias simulaciones fallidas y de corregir algunas configuraciones en las fronteras de carga constante necesarias para la simulación se obtuvo una configuración adecuada pero mejorable del sistema en la que se simula claramente la entrada de flujo proveniente de la zona norte, este y oeste, así como la dirección general del flujo hacia la zona del valle y el acuífero de la zona metropolitana de la ciudad de México. En la Figura 5.18 se puede observar el resultado de la simulación de flujo en estado estacionario.

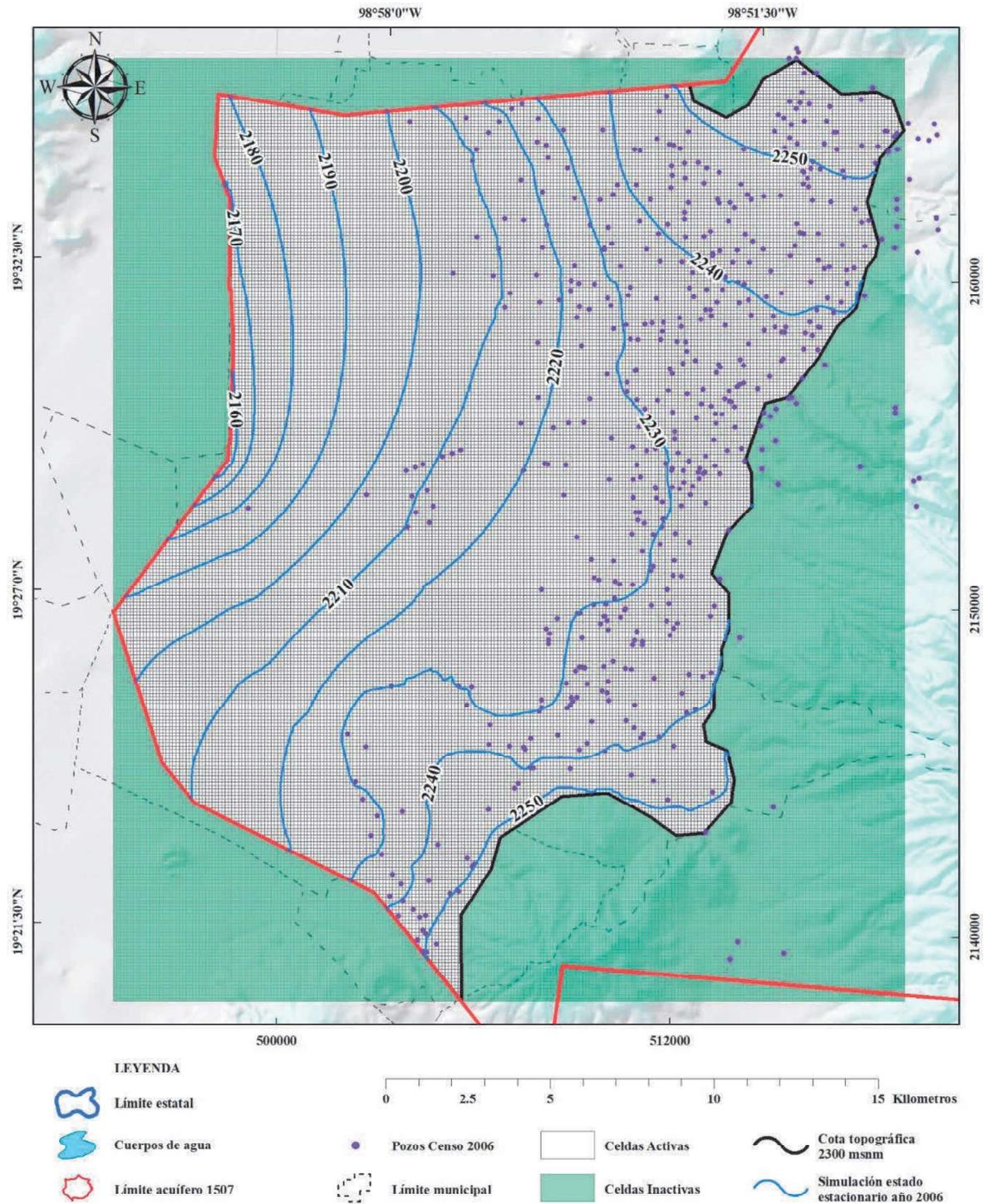


Figura 5.18. Simulación de flujo de aguas subterráneas en estado estacionario para el año 2006 (msnm).

### 5.3.6. Simulación de flujo de aguas subterráneas en estado transitorio para el período comprendido entre los años 2006 y 2018

Como resultado de la simulación en estado estacionario se detectó que existían algunos pozos de extracción que se encontraban ubicados en la cercanía de la frontera seleccionada, pero quedaban fuera de esta, por lo que se decidió modificarla. Para la nueva configuración de la frontera se tomó como base la cota topográfica 2350 msnm, límite dentro del cual se encuentran una mayor cantidad de pozos de extracción. Además, se modificó la frontera en la parte sureste para dejar fuera del modelo pequeñas montañas que había en la zona. En la Figura 5.19 se pudo observar la distribución de la nueva frontera y los pozos, tanto de extracción del REPDA del año 2019 como los de la red piezométrica del año 2018.

Una vez asignados los parámetros hidráulicos y especificadas las condiciones de frontera, se llevó a cabo la simulación en estado transitorio para un período de 4748 días que comprenden del 1 de enero del 2006 hasta el 31 de diciembre del 2018. La configuración de los pozos de extracción distribuidos en el dominio del modelo quedó conformada por 438 pozos con valores de la base de datos del REPDA 2019. Además, la configuración de la red piezométrica quedó conformada por 22 pozos que cuentan con información durante todos los años del período de simulación.

La simulación inicial en estado transitorio del modelo arrojó una configuración piezométrica adecuada, en la que se pueden observar los diferentes mecanismos de recarga y descarga que han quedado plasmados durante el desarrollo del modelo conceptual. No obstante, las diferencias entre los valores observados y calculados por el modelo hacen necesario llevar a cabo una etapa de calibración en la cual se puedan ajustar de mejor manera estos valores.

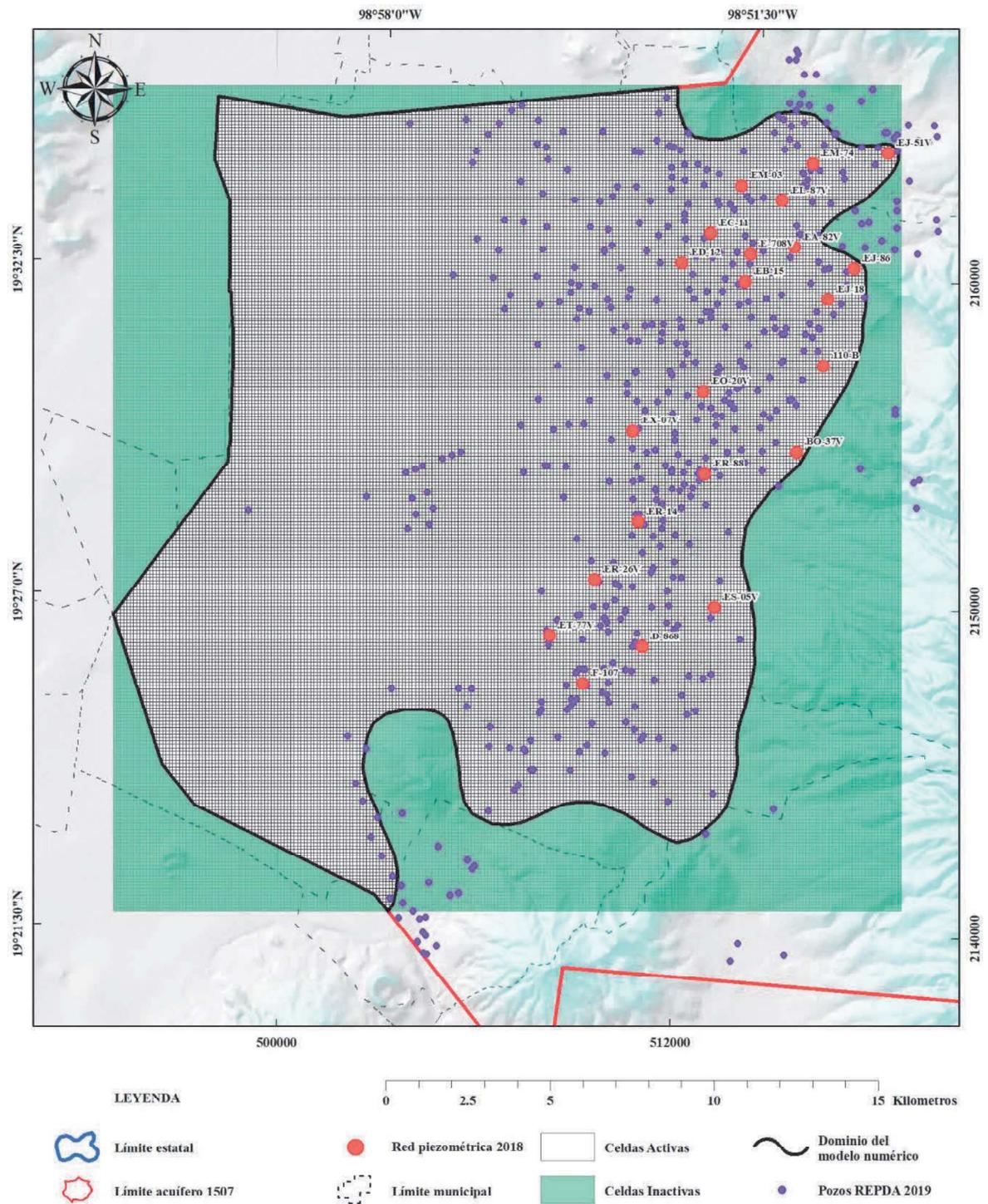


Figura 5.19. Distribución espacial de la nueva frontera del modelo y los pozos de extracción y observación.

### 5.3.7. Calibración del modelo numérico de flujo

La calibración de un modelo de flujo de agua subterránea consiste en el ajuste de los valores calculados por el modelo con los valores de las mediciones u observaciones realizadas en campo, hasta lograr la mayor aproximación posible de estos. En la literatura el método más ampliamente empleado con este fin es el de prueba y error y es el que se utilizó para calibrar el modelo del Acuífero Texcoco.

Se llevaron a cabo numerosas simulaciones con variaciones de diferentes variables del modelo hasta conseguir una configuración piezométrica adecuada para el sistema. En la Figura 5.20 se puede ver la configuración piezométrica obtenida para el año 2018 y se puede apreciar la entrada de flujo de la zona este, norte y sureste, así como la salida de flujo del sistema por la zona oeste hacia el acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México.

En las Tablas 5.9 y 10. y se puede consultar los valores de las propiedades del modelo antes y después de la calibración.

**Tabla 5.9. Propiedades del modelo numérico antes de la calibración.**

Unidad	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]	Ss [1/m]	Sy[]	Eff. Por[]	Tot. Por[]
UH-1	0.0121	0.0121	0.00121	0.00001	0.0300	0.15	0.3
UH-2	3.0240	3.0240	0.30240	0.00001	0.1500	0.15	0.15
UH-3	0.4320	0.4320	0.04320	0.00001	0.1200	0.15	0.15
UH-4	3.4560	3.4560	0.34560	0.00001	0.1500	0.15	0.04
UH-5	0.0017	0.0017	0.00017	0.00001	0.1500	0.29	0.15
UH-6	6.0480	6.0480	0.60480	0.00001	0.1500	0.25	0.25

**Tabla 5.10. Propiedades del modelo numérico después de la calibración.**

Unidad	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]	Ss [1/m]	Sy[]	Eff. Por[]	Tot. Por[]
UH-1	0.0121	0.0121	0.00240	0.01130	0.0300	0.15	0.3
UH-2	3.0240	3.0240	0.30240	0.00007	0.1700	0.15	0.15
UH-3	0.4320	0.4320	0.02160	0.00001	0.1400	0.15	0.15
UH-4	3.0000	3.0000	0.30000	0.00001	0.1500	0.15	0.04
UH-5	0.0017	0.0017	0.00017	0.00004	0.2000	0.29	0.15
UH-6	4.0000	4.0000	0.40000	0.00001	0.1500	0.25	0.25

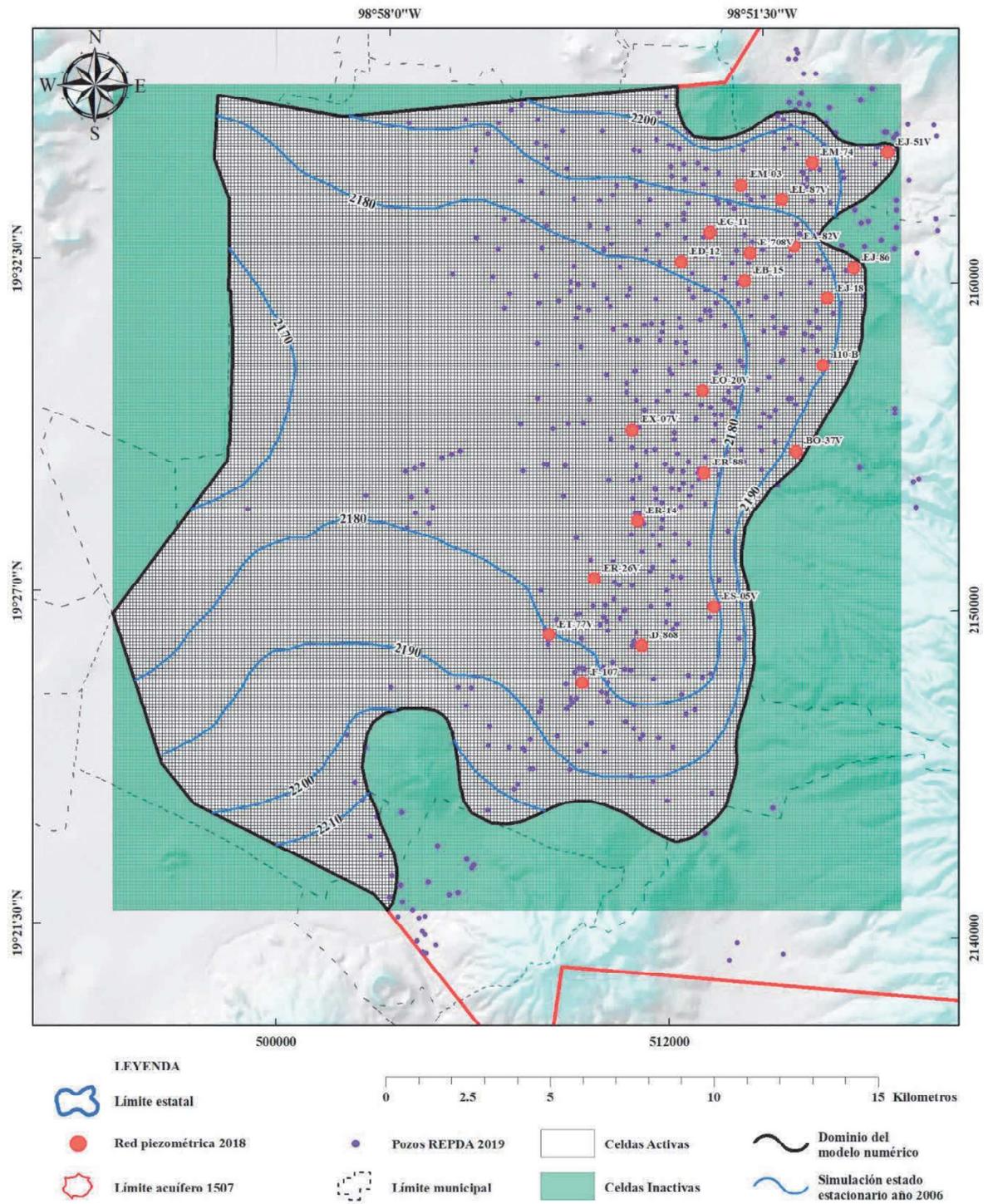


Figura 5.20. Simulación de flujo de aguas subterráneas en estado transitorio para el año 2018 (msnm).

### 5.3.7. Balance general en el Acuífero Texcoco para el periodo 2006 – 2018

Con base en los resultados obtenidos durante las calibraciones realizadas sobre el modelo para el período 2006-2018; se estima una entrada de flujo por recarga vertical de 58.79 hm<sup>3</sup>/año; una entrada de flujo horizontal total aproximada de 114.01 hm<sup>3</sup>/año, siendo la frontera este la zona principal de aportación. En cuanto a las salidas de flujo en el sistema, se tiene una descarga natural hacia el acuífero de la Zona Metropolitana de la ciudad de México en el orden de los 13.44 hm<sup>3</sup>/año y una descarga aproximada por bombeo de 192.54 hm<sup>3</sup>/año (Figura 5.21, Tabla 5.11).

**Tabla 5.11. Balance general para el año 2018**

Elementos	Entradas (hm <sup>3</sup> /año)	Salidas (hm <sup>3</sup> /año)
Almacenamiento	80.42	33.53
Carga Constante	31.69	13.44
Pozos	0.00	192.54
Evapotranspiración	0.00	0.68
Carga Variable	82.32	13.03
Recarga	58.79	0.00
Total	253.23	253.23

En la figura 5.22 se puede observar la correlación que existe entre los valores calibrados y los observados para cada uno de los pozos que conforman la red piezométrica del modelo numérico de flujo. Se puede apreciar también que se obtuvo un error cuadrático medio normalizado de 11.74% lo que demuestra que ambos valores se encuentran en un rango próximo.

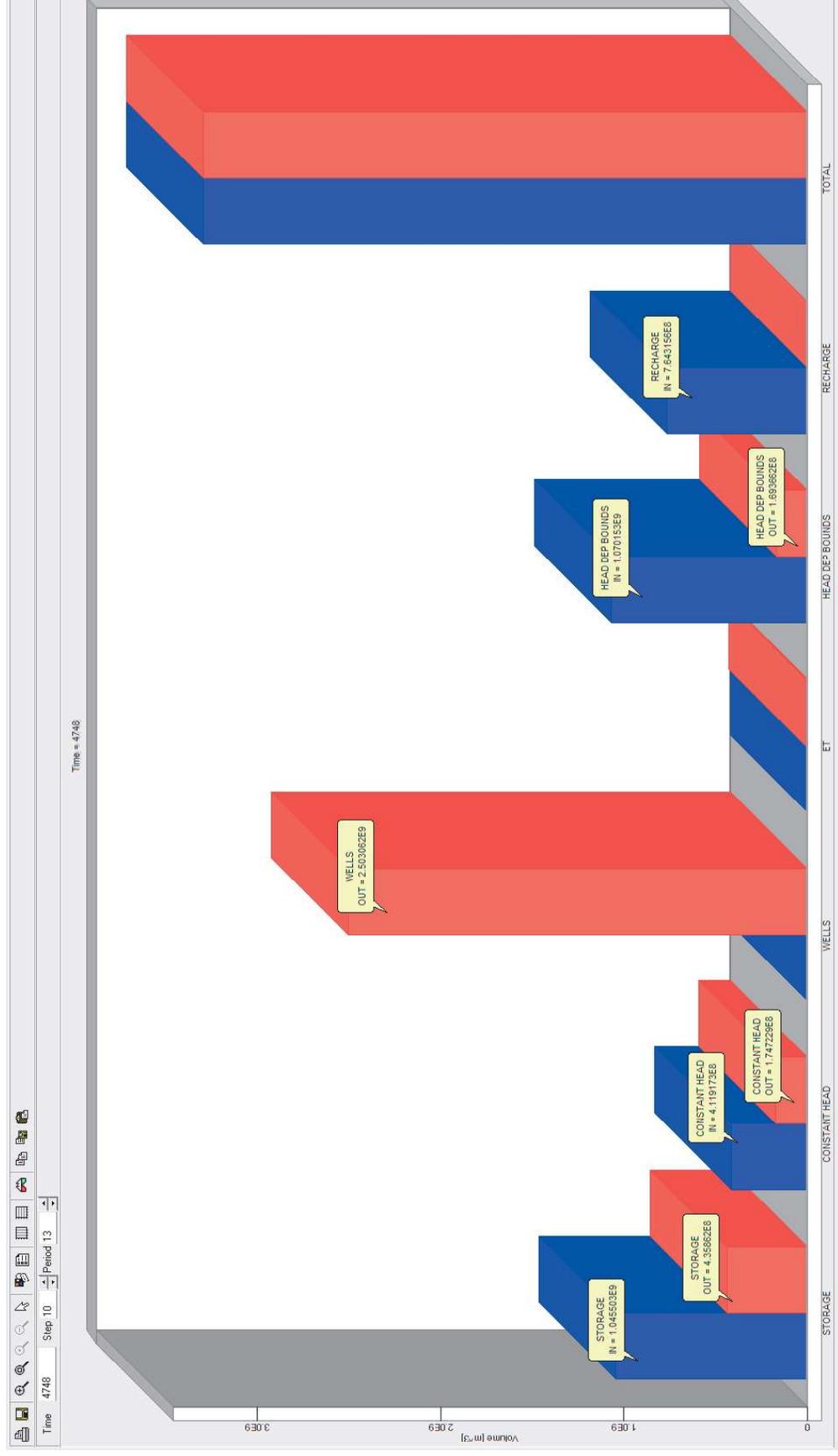


Figura 5.21. Balance general para el Acuífero Texcoco para el periodo de 2006- 2018.



## **CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES PARCIALES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. Conclusiones**

Con base en los objetivos planteados y el cronograma propuesto se crearon las bases de datos necesarias para continuar desarrollando en un futuro próximo las actividades que den cumplimiento a las metas trazadas, esto a través de la integración de los Sistemas de Información Geográfica, y las herramientas hidrogeológicas.

La información recopilada y analizada permitió la creación de diversos mapas sobre características varias del área de estudio (se pueden consultar a lo largo que todo el documento). Además, como resultado del análisis hidrodinámico del acuífero, se generaron las isolíneas del nivel piezométrico para los años 2006 y 2018 las de evolución de nivel entre estos años.

Con los elementos e insumos generados se pudo desarrollar un modelo conceptual hidrogeológico que nos permitió comprender de mejor forma el comportamiento hidrodinámico el acuífero; los valores y distribución de parámetros hidráulicos, así como los distintos mecanismos de recarga existentes en el acuífero; estableciendo, además, la influencia de elementos adicionales como la variación climatológica en el comportamiento del sistema.

La integración de todos los elementos desarrollados permitió la implementación de un modelo numérico de flujo de aguas subterráneas que reflejó de manera adecuada los mecanismos que rigen la dinámica de las aguas subterráneas en el territorio. La utilización del modelo numérico de flujo es una poderosa herramienta que nos permite la incorporación de nueva información y una correcta gestión de los recursos hídricos de la zona del Acuífero Texcoco.

## **6.2. Recomendaciones**

Uno de los aspectos de mayor incertidumbre en el modelo conceptual hidrogeológico generado durante esta investigación, es el volumen de extracción real de los pozos de explotación, principalmente los destinados al uso agrícola. En este caso se utilizaron los datos oficiales inscritos en la base de datos del REPDA, sin embargo, a pesar de existir esta fuente adicional de información, aún existen controversias con respecto al volumen real de extracción en la zona de estudio, por tal razón, se recomienda centrar los esfuerzos en la cuantificación de este parámetro tan importante del acuífero.

Debido a la complejidad del acuífero, se recomienda actualizar el modelo conceptual continuamente, tomando en cuenta las variaciones en la tendencia de la precipitación, los cambios en la recarga y el volumen de extracción. Del mismo modo y debido a lo anterior, se recomienda tener precaución con los pronósticos realizados a largo plazo ya que podrían generar sesgos e incertidumbres importantes en la evaluación y manejo del Acuífero Texcoco.

Se recomienda para futuras investigaciones realizar un análisis profundo de la precipitación y la evapotranspiración de la zona de estudio pues los datos utilizados para la presente investigación son bastante regionales y no representan en una correcta medida las pequeñas variaciones locales que pueden ocurrir en la zona.

Por último pero no menos importante se recomienda seguir alimentando el modelo con nueva información que pueda surgir al pasar los años para que no quede desactualizado y que sea una valiosa herramienta para mejorar los planes de manejo del acuífero Texcoco.



## Referencias bibliográficas

- Aguilar, A.A., Rivero, M.H., Inoue, A.C. (2011). La gestión del agua en la Región Texcoco, Estado de México. *Espacios Públicos*, vol. 14, núm. 30, enero-abril, 2011, pp. 54-71 Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.
- Aguilera, R., Ramos, L.C. (2019). Agua subterránea: parámetros óptimos del algoritmo evolución y mezcla de complejos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. Publisher: Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, CUJAE. 40, 80–94.
- Alves, A. (2018). *Elementos Finitos a base da Tecnología CAE*. Saraiva Educação SA, 2018.
- Anderson, M.P., Woessner, W.W., Hunt, R.J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic Press. Libro.
- Antonio, D.H. (2017). Modelación numérica para la determinación de flujos subterráneos. Sitio Piloto: La Paz, Baja California Sur, México 138.
- Arévalo, M.A. (2018). Propuesta de diseño de construcción, acondicionamiento de un pozo de agua y su incidencia en la vulnerabilidad del acuífero costero en Manglaralto. Trabajo final para la obtención del título: Máster en Ciencias Ambientales, Espol, FCNM. Guayaquil. 77 p.
- Ariel Constructores S.A. de C.V. (2007). Estudio hidrogeoquímico, así como de evolución de la calidad del agua subterránea en la cuenca del Valle de México año 2007, Ciudad de México, México.
- Arratia, N., Abdiel, N. (2019). Disponibilidad actual y futura de los recursos hídricos, y uso eficiente del agua en la minería chilena (Tesis). Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
- Benítez, C., Arias, W., y Quiroz, J. 1980. Manual de conservación de suelos y aguas. Ministerio de Agricultura y Alimentación. Lima (Perú).
- Bertule, M., Glennie, P., Koefoed, P.B., James, G.L., Kjellen, M., Dalton, J., Rieu, A.C., Romano, O., Tropp, H., Newton, J., Harlin, J. (2018). Monitoring Water Resources Governance Progress Globally: Experiences from Monitoring SDG Indicator 6.5.1 on Integrated Water Resources Management Implementation, *Water*. 10, 1744. <https://doi.org/10.3390/w10121744>.
- Cardona, A., y Hernández, N. (1985). Modelo geoquímico conceptual de la evolución del agua subterránea en el Valle de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(3), 71-90.
- Carvalho, V.A., Almeida, J.P. (2018). Toward a well-founded theory for multi-level conceptual modeling. *Software & Systems Modeling*. *Softw Syst Model* 17, 205–231. <https://doi.org/10.1007/s10270-016-0538-9>.
- CFE. (1996). Estudio Geofísico geohidrológico de la zona del Lago Nabor Carrillo, Texcoco, Estado de México. Comisión Federal de Electricidad. (Reporte Técnico). Subdirección Técnica Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil. Ciudad de México, México.

- Chen, C., Chen, D., Yan, Y., Zhang, G., Zhou, Q., Zhou, R. (2018). Integration of numerical model and cloud computing. *Future Generation Computer Systems*. 79, 396–407. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.06.007>.
- CIGSA. (2011). Estudio de exploración geofísica, modelo tridimensional de la geología del subsuelo, integración de los censos de aprovechamientos de las aguas subterráneas históricos y su actualización, reconstrucción de los registros piezométricos e hidrométricos históricos y recorridos piezométrico e hidrométrico, asociados a la recarga artificial con agua residual tratada al acuífero Cuautitlán-Pachuca, en la zona de El Caracol, Estado de México, Consorcio de Ingenieros de Guanajuato S.A. de C.V. Ciudad de México.
- CMMAD. (1987). Informe Brundtland. Desarrollo y cooperación económica internacional: Medio Ambiente. Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Cuadragésimo segundo período de sesiones. Asamblea General de las Naciones Unidas. [http://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE\\_LECTURE\\_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf](http://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf)
- CONAGUA. (2002). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Texcoco, Estado de México, Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2006). Estudio de modelación para determinar el comportamiento de los acuíferos Texcoco y Chalco-Amecameca, Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México.
- CONAGUA. (2012). Pruebas de recarga instantánea y a corto plazo (activa y pasiva), Proyecto piloto de recarga Artificial El Caracol, Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México.
- CONAGUA. (2014a). Manual de integración, estructura orgánica y funcionamiento. Comisión Nacional del Agua 253. Ciudad de México, México.
- CONAGUA. (2014b). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Texcoco (1507), Comisión Nacional del Agua. Estado de México, México.
- CONAGUA. (2015). Estudio, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México.
- CONAGUA. (2018a). Actualización de la disponibilidad de agua del acuífero Texcoco (1507), Estado de México. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos. Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA. (2018b). Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua. secretaría de medio ambiente y Recursos naturales.
- CONAGUA y Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala. (2006b). Proyecto de relocalización, reposición y rehabilitación de pozos pertenecientes al Programa de Acción Inmediata (PAI), Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México.

- CONAGUA-UACH. (2009). Estudio de Manejo de la demanda de agua subterránea para el Acuífero Texcoco, Estado de México. Convenio de colaboración OAVM-DT-MEX-09-463-RF-CC. Universidad Autónoma de Chapingo.
- COPEI Ingeniería. (2015). Proyecto Texcoco, Consultoría de Prácticas Educativas Innovadoras. (Reporte Técnico), Ciudad de México, México.
- CTAEM. (2019). Términos de referencia para la formulación del plan operativo de manejo del acuífero Texcoco. Estado de México.
- Custodio, E., Llamas, M. R., y Samper, J. (1997). La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Asociación Internacional de Hidrogeólogos.
- Defáz, C., Sixto, H. (2019). Evaluación de la calidad del agua subterránea en pozos de abastecimiento para consumo humano del cantón Quevedo. 2019. Tesis de Licenciatura. Quevedo-UTEQ.
- DOF, D. O. D. L. F. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000. Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, Comisión Nacional del Agua, México.
- Domenico, P. A. (1972). Concepts and models in groundwater hydrology. McGrawHill, New York.
- Enemark, Peeters, L.J., Mallants, D., Batelaan, O. (2019). Hydrogeological conceptual model building and testing: A review. *Journal of Hydrology*. 569, 310–329. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.007>.
- Escobar, B.S., Palacios, O.L. (2012). Análisis de la sobreexplotación del acuífero Texcoco, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 3, 67–84.
- Esperanza, L.E. (2015). Consultoría para el manejo integral del recurso hídrico: prospectiva del acuífero Texcoco desde el municipio de Nezahualcóyotl, Estado de México.
- Fernández, I. (2017). Modelación matemática del flujo de agua subterránea del acuífero de Requena Utiel. Estudio del plan de explotación de la masa de agua. Trabajo de fin de máster. Universidad Politécnica de Valencia.
- Forster, C., & Smith, L. (1988). Groundwater flow systems in mountainous terrain: 2. Controlling factors. *Water Resources Research*, 24(7), 1011-1023.
- Freeze, R. A., y Cherry, J. A. (1979). *Groundwater* (No. 629.1 F7).
- García, E. (1998). Climas (Clasificación de Köppen, modificada por García) Escala 1: 1 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, DF, México.
- Geoevaluaciones y Perforaciones S.A. de C.V. (2012). Estudio de pruebas de recarga continua y su monitoreo, bajo diferentes cargas hidráulicas, en pozos piloto de recarga profunda, asociados a la recarga artificial con agua residual tratada al acuífero Cuautitlán-Pachuca. Estado de México, México.

- González, C., Badii, A.M., Castillo, D., Lugo, O. (2018). Reservas de agua potable en México y su relación con la sustentabilidad. *Revista Daena (International Journal of Good Conscience)*. 13.
- Fries, C. (1960). Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, Región Central Meridional de México/Carl Fries (No. 550 F3.), Universidad Nacional Autónoma de México.
- Haitjema, H., Kelson, V., y de Lange, W. (2001). Selcting MODEFLOW cell sizes for accurate flow fields. *Ground water*, 39(6), 931.
- Hamad, A., Hadji, R., Bâali, F., Houda, B., Redhaounia, B., Zighmi, K., Legrioui, R., Brahmi, S., Hamed, Y. (2018). Conceptual model for karstic aquifers by combined analysis of GIS, chemical, thermal, and isotopic tools in Tuniso-Algerian transboundary basin. *Arab. J. Geosci.* 11, 409. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3773-2>.
- Hernández, R.A., Martínez, L.M., Peñuela, L.A., Rivera, S.R. (2019). Gestión del agua subterránea en los acuíferos de la cuenca del río Ayuquila-Armería en Jalisco y Colima, México. *Región y Sociedad*. 31, e1093. <https://doi.org/10.22198/rys2019/31/1093>.
- IG-UNAM. (2011). Proyecto de recarga artificial del acuífero con aguas tratadas del módulo experimental de tratamiento terciario en la zona federal del Lago de Texcoco, Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- II-UNAM. (2018). Estudios de la segunda etapa del modelo numérico del acuífero del Valle de México, Plan de gestión integral del acuífero del Valle de México, Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- INEGI. (2005). II conteo de población y vivienda. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2010). XII censo de población y vivienda. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2014). Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000: serie V / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México: INEGI, c2014.
- INEGI. (2015). Censos y conteos de población y vivienda. México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- IUSS. (2007). Grupo de Trabajo WRB. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO. Roma. 2007.
- Klink, F.A. (2018). Hacia una nueva economía del agua: cuestiones fundamentales. *Polis, Revista Latinoamericana*. Hacia una cultura del agua. *Polis Revista Latinoamericana*. Centro de Investigación Sociedad y Políticas Públicas (CISPO). URL: <http://journals.openedition.org/polis/5044>. ISSN: 0718-6568.

- Konikow, L.F., Bredehoeft, J.D. (1992). Ground-water models cannot be validated. *Adv. Water Resour.* 15, 75–83.
- Lesser, J. M. y González, D. (2005). El agua subterránea de la Ciudad de México. V congreso de aguas subterráneas Hermosillo, Son, 2005-08-30. AGM.
- Liu, J., Xie, X., Ma, Z., Fang, G., He, H., Du, M. (2018a). A Multiple-Iterated Dual Control Model for Groundwater Exploitation and Water Level Based on the Optimal Allocation Model of Water Resources. *Water* 10, 432. <https://doi.org/10.3390/w10040432>.
- Liu, X.X., Shen, S.L., Xu, Y.S., Yin, Z.Y. (2018b). Analytical approach for time-dependent groundwater inflow into shield tunnel face in confined aquifer. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.* 42, 655–673. <https://doi.org/10.1002/nag.2760>.
- Lojero-Ochoa, V. A. (2014). Evaluación de los asentamientos por consolidación de los suelos lacustres en la zona del proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM) en el antiguo Lago de Texcoco, (Tesis de maestría), Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Martínez, P.F., Díaz, C.D., Moeller, G.C. (2019). Seguridad hídrica en México: diagnóstico general y desafíos principales. *Ingeniería del Agua.* 23, 107. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.10502>.
- McDonald, M. G., y Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. US Geological Survey. *Techniques of water-resources investigations 06-A1*, USGS, Reston, VA, USA, 572 pp.
- Medina, C. M. (2017). Desarrollo de una metodología para la construcción de modelos conceptuales en acuíferos de alta complejidad hidrogeológica: Caso de estudio, acuífero del valle de San Juan del Río (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México.
- Mendoza-Archundia, E. (2012). Caracterización hidrogeológica de la porción sureste de la planicie de Texcoco, Estado de México, para establecer sitios de recarga artificial al acuífero. (Tesis de Licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Mooser, H. 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.
- Mooser, H. F., Montiel, A., Zuñiga, A. (1996). Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla, Comisión Federal de Electricidad, First Edition, México, 1996. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVII, num 3. doi: 10.1016/j.riit.2016.07.001.
- Mooser, H. F. (2018). Geología del Valle de México y otras regiones del país. Presentación de Guillermo Villalobos y prólogo de Daniel Reséndiz Núñez México: Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C., ISBN n/a. Seis mapas y 11 perfiles.
- Morales, J.A., Rodríguez, L. (2020). Sustentabilidad de la huella hídrica en la cuenca del valle de México, Water footprint sustainability at valley of Mexico's basin.

- Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México. Tecnología y Ciencias del Agua 11. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-04-03>.
- Morris, D. A., y Johnson, A. I. (1967). Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials as analyzed by the hydrologic laboratory of the US Geological Survey, 1948-60 (No. 1839-D). US Government Printing Office.
- Navarro, I. (2005). Análisis de Estrategias de Manejo Integral del Agua Subterránea mediante Modelación de Flujo: Cuenca de la Independencia, Guanajuato, México. Tesis Doctoral. Instituto de Geología. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. México.
- OCAVM. y Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). (2018). Datos piezométricos del Valle de México, Organismo de cuenca Aguas del Valle de México. Ciudad de México, México.
- Olalekan, R.M., Omidiji, A.O., Williams, E.A., Christianah, M.B., Modupe, O. (2019). The roles of all tiers of government and development partners in environmental conservation of natural resource: a case study in Nigeria. *MOJ Ecology & Environmental Sciences*. 4, 114–121.
- ONU. (2019). Informe de los Objetivos del Desarrollo Sostenible. Organización de las Naciones Unidas (United Nations). Nueva York.
- ONU. (2018). Progreso sobre Gestión Integrada de Recursos Hídricos, Sumario Ejecutivo. United Nations.
- Palacios-Vélez, O. L., y Escobar-Villagrán, B. S. (2016). La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(2), 5-16.
- Peherstorfer, B., Willcox, K. (2016). Data-driven operator inference for nonintrusive projection-based model reduction. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 306, 196–215. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.03.025>.
- Piñón Martínez, N. (1989). Módulo experimental de recarga de acuíferos. *Ingeniería hidráulica en México: publicación técnica de la Secretaría de Recursos Hidráulicos*, 4(2), 67-72.
- Raghavan, Chen, C. (2019). The Theis solution for subdiffusive flow in rocks. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*. 74, 6. <https://doi.org/10.2516/ogst/2018081>.
- Rahman, M., Islam, A., Bodrud, M., Muhib, I., Zahid, A., Shammi, M., Tareq, S.M., Kurasaki, M. (2018). Spatio-Temporal Assessment of Groundwater Quality and Human Health Risk: A Case Study in Gopalganj, Bangladesh. *Exposure and Health*. Expo Health 10, 167–188. <https://doi.org/10.1007/s12403-017-0253-y>.
- Ramos, L.C., Cabrera, E., Hernández, A.O., Marón, D.E. (2013). Estimación de los parámetros de la ecuación del flujo del agua subterránea mediante el algoritmo de optimización PSO. IX Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería 2013 ISBN 978-980-7630-00-9.

- Ramos, L.C., Cabrera, E., Marón, D.E., Hernández, A.O. (2016). Optimización de los costos de operación para acuíferos en régimen permanente. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. Publisher: Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José. 37, 107–118.
- Reilly, T. E., y Harbaugh, A. W. (2004). Guidelines for evaluating groundwater flow models: US Geological Survey Scientific Investigations Report 2004–5038 USGS. Reston, Virginia.
- Rudolph, D. L., Cherry, J. A., y Farvolden, R. N. (1991). Groundwater flow and solute transport in fractured lacustrine clay near Mexico City. *Water Resources Research*, 27(9), 2187-2201.
- SEA (2012). Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA. Servicio de Evaluación Ambiental, SEA.
- Segerstrom, K. (1962). Geology of south-central Hidalgo and North-eastern México: United States Geological Survey Bulletin, US Government Printing Office, 1104-C, 87–162.
- SEMARNAT (2018). 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.
- SEMARNAT y CONAGUA. (2018). Estudios básicos, factibilidad y proyecto ejecutivo (piloto) de recarga artificial en el acuífero de Texcoco, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México.
- Sethi, R., Di Molfetta, A., Sethi, R., Di Molfetta, A. (2019). Analytical Solutions of the Groundwater Flow Equation. *Groundwater Engineering*. Springer International Publishing., in: Springer Tracts in Civil Engineering. Cham, pp. 33–53. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-20516-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-20516-4_3).
- SMG. (2002). Carta magnética de campo total Ocampo G–13–3, Estado de Coahuila: Pachuca, Hidalgo, México, Servicio Geológico Mexicano.
- SHCP. (1969). Proyecto Texcoco, memoria de los trabajos realizados y conclusiones, Fiduciaria Nacional Financiera S.A, Secretaría de Hacienda y Crédito Público. Ciudad de México.
- Singh, A. (2014). Simulation and optimization modeling for the management of groundwater resources. II: Combined applications. *J. Irrig. Drain. Eng.* 140, 04014002.
- Suárez, P. (2019). Modelo matemático de flujo del acuífero Texcoco, como una herramienta de gestión y planificación hídrica para el desarrollo sustentable de la región, Universidad Autónoma del Estado de México. (Tesis para optar al título de Ingeniero Geólogo).
- Tahershamsi, A., Feizi, A., Molaei, S. (2018). Modeling Groundwater Surface by MODFLOW Math Code and Geostatistical Method. *Civ. Eng. J.* 4, 812. <https://doi.org/10.28991/cej-0309135>.
- Unda-López J. A. (2016). Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del Valle de México. (tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

- UNESCO. (2015). Mejorar el manejo sustentable de las aguas subterráneas [WWW Document]. UNESCO. URL <https://es.unesco.org/themes/garantizar-suministro-agua/hidrologia/agua-subterranea/manejo-sustentable> (accessed 5.12.20).
- UNESCO. (2012). The United Nations World Water Development Report 4. Vol. 1: Managing Water Uncertainty and Risk. United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO)/Paris.
- USGS. (2016). (United States Geological Survey). Page web: MODFLOW: USGS three-dimensional finite-difference ground-water model. <http://water.usgs.gov/ogw/modflow/MODFLOW.html>.
- Vázquez-Sánchez, E. y Jaimes-Palomera, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2), 133-190. Retrieved from <http://revistagi.geofisica.unam.mx/index.php/RGI/article/view/1026>.
- Vélez, M. (2010). Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos. Grupo de Recurso Hídrico – Dirección de Ecosistemas Programa de Inversión para el Desarrollo Sostenible –IDS- (BIRF). Medellín, Colombia. 84 pp.
- Waterloo. H. (2015). User Manual, Visual MODFLOW Flex. Integrated Conceptual & Numerical Groundwater Modeling. Waterloo Hydrogeologic. [https://www.waterloohydrogeologic.com/wp-content/uploads/2015/11/VMODFlex\\_UsersManual.pdf](https://www.waterloohydrogeologic.com/wp-content/uploads/2015/11/VMODFlex_UsersManual.pdf)
- WWAP/ONU. (2018). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la Naturaleza para la gestión del agua. Paris: UNESCO.
- WWAP/UNESCO. (2015). Agua para un mundo sostenible: Datos y cifras. Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). World Water Assessment Programme. [WWW Document]. URL [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000232272\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000232272_spa) (accessed 5.25.20).
- Zaragoza. H. U. (2021). Estimación de la recarga potencia en el acuífero Texcoco, Estado de México. Tesis de maestría. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua. Universidad Autónoma del Estado de México, México.

## Anexos 1

Nombre Pozo	Coord. X	Coord. Y	Elevación	Prof. Pozo	Id Ranurado	Altura Ranurado	Prof. Ranurado	Fecha Inicio Bombeo	Fecha Fin Bombeo	Ritmo Extracción
61	509323.90	2162610.10	2238.48	1983.48	Screen0	2138.48	1988.48	1/1/2006	12/31/2018	-414.25
121	506528.04	2158997.23	2231.99	1976.99	Screen0	2131.99	1981.99	1/1/2006	12/31/2018	-2958.90
163	506090.02	2161594.38	2233.02	1978.02	Screen0	2133.02	1983.02	1/1/2006	12/31/2018	-2397.26
289	505946.47	2163902.71	2234.56	1979.56	Screen0	2134.56	1984.56	1/1/2006	12/31/2018	-1633.41
290	506432.72	2164757.38	2239.84	1984.84	Screen0	2139.84	1989.84	1/1/2006	12/31/2018	-2199.96
295	508887.76	2160765.64	2238.96	1983.96	Screen0	2138.96	1988.96	1/1/2006	12/31/2018	-887.67
296	507866.64	2163531.53	2238.82	1983.82	Screen0	2138.82	1988.82	1/1/2006	12/31/2018	-1413.70
310	509956.94	2161245.70	2241.33	1986.33	Screen0	2141.33	1991.33	1/1/2006	12/31/2018	-895.89
335	505376.45	2160490.68	2239.41	1984.41	Screen0	2139.41	1989.41	1/1/2006	12/31/2018	-2022.44
339	506057.07	2164243.93	2239.46	1984.46	Screen0	2139.46	1989.46	1/1/2006	12/31/2018	-1002.74
406	509616.30	2160704.54	2234.16	1979.16	Screen0	2134.16	1984.16	1/1/2006	12/31/2018	-608.22
407	509616.30	2160704.54	2234.16	1979.16	Screen0	2134.16	1984.16	1/1/2006	12/31/2018	-608.22
434	508836.78	2163685.67	2242.72	1987.72	Screen0	2142.72	1992.72	1/1/2006	12/31/2018	-1312.33
440	508225.74	2161939.49	2235.46	1980.46	Screen0	2135.46	1985.46	1/1/2006	12/31/2018	-657.53
441	506731.21	2161228.83	2232.64	1977.64	Screen0	2132.64	1982.64	1/1/2006	12/31/2018	-526.03
503	506767.64	2165089.47	2241.13	1986.13	Screen0	2141.13	1991.13	1/1/2006	12/31/2018	-2019.71
504	507134.56	2165483.05	2247.09	1992.09	Screen0	2147.09	1997.09	1/1/2006	12/31/2018	-1940.09
166	509089.86	2164484.97	2237.76	1982.76	Screen0	2137.76	1987.76	1/1/2006	12/31/2018	-301.37
167	509060.72	2164484.95	2239.01	1984.01	Screen0	2139.01	1989.01	1/1/2006	12/31/2018	-1835.62
510	514217.31	2164703.46	2260.59	2005.59	Screen0	2160.59	2010.59	1/1/2006	12/31/2018	-596.67
2	510196.79	2164762.20	2244.44	1989.44	Screen0	2144.44	1994.44	1/1/2006	12/31/2018	-1420.27
52	511713.84	2161566.43	2245.73	1990.73	Screen0	2145.73	1995.73	1/1/2006	12/31/2018	-13.72
56	511567.99	2161812.23	2247.94	1992.94	Screen0	2147.94	1997.94	1/1/2006	12/31/2018	-95.89
117	512150.71	2161874.10	2247.52	1992.52	Screen0	2147.52	1997.52	1/1/2006	12/31/2018	-18.55
237	513228.97	2161690.43	2253.17	1998.17	Screen0	2153.17	2003.17	1/1/2006	12/31/2018	-164.38

238	513195.59	2163503.92	2251.86	1996.86	Screen0	2151.86	2001.86	1/1/2006	12/31/2018	-6.58
282	511129.27	2164455.38	2248.32	1993.32	Screen0	2148.32	1998.32	1/1/2006	12/31/2018	-734.25
298	504806.89	2165374.69	2228.67	1973.67	Screen0	2128.67	1978.67	1/1/2006	12/31/2018	-1545.21
299	509919.98	2164832.74	2244.62	1989.62	Screen0	2144.62	1994.62	1/1/2006	12/31/2018	-1541.10
309	510896.32	2164252.37	2249.71	1994.71	Screen0	2149.71	1999.71	1/1/2006	12/31/2018	-147.95
356	505534.55	2167526.53	2233.83	1978.83	Screen0	2133.83	1983.83	1/1/2006	12/31/2018	-295.89
365	512265.60	2164302.43	2253.73	1998.73	Screen0	2153.73	2003.73	1/1/2006	12/31/2018	-33.42
408	511566.20	2164584.76	2252.36	1997.36	Screen0	2152.36	2002.36	1/1/2006	12/31/2018	-1432.14
431	510666.12	2164295.27	2247.18	1992.18	Screen0	2147.18	1997.18	1/1/2006	12/31/2018	-813.70
450	514336.84	2160953.58	2260.20	2005.20	Screen0	2160.20	2010.20	1/1/2006	12/31/2018	-936.99
475	513549.96	2161075.92	2252.88	1997.88	Screen0	2152.88	2002.88	1/1/2006	12/31/2018	-1150.68
136	512994.77	2163196.39	2253.47	1998.47	Screen0	2153.47	2003.47	1/1/2006	12/31/2018	-1278.25
195	511131.17	2161381.63	2244.00	1989.00	Screen0	2144.00	1994.00	1/1/2006	12/31/2018	-67.12
256	512568.31	2164720.67	2262.61	2007.61	Screen0	2162.61	2012.61	1/1/2006	12/31/2018	-12.47
499	516614.16	2156175.89	2348.29	2093.29	Screen0	2248.29	2098.29	1/1/2006	12/31/2018	-47.16
502	513171.19	2161014.17	2258.55	2003.55	Screen0	2158.55	2008.55	1/1/2006	12/31/2018	-164.38
391	512763.22	2161035.38	2247.08	1992.08	Screen0	2147.08	1997.08	1/1/2006	12/31/2018	-56.81
138	513869.33	2162582.31	2260.69	2005.69	Screen0	2160.69	2010.69	1/1/2006	12/31/2018	-49.32
139	512645.88	2162151.08	2252.20	1997.20	Screen0	2152.20	2002.20	1/1/2006	12/31/2018	-32.88
142	513519.64	2162643.51	2255.80	2000.80	Screen0	2155.80	2005.80	1/1/2006	12/31/2018	-142.47
494	506410.62	2161379.33	2232.31	1977.31	Screen0	2132.31	1982.31	1/1/2006	12/31/2018	-864.00
495	512705.26	2160583.51	2235.32	1980.32	Screen0	2135.32	1985.32	1/1/2006	12/31/2018	-360.00
496	506555.36	2163992.06	2235.03	1980.03	Screen0	2135.03	1985.03	1/1/2006	12/31/2018	-227.24
70	511694.86	2145890.46	2254.38	1999.38	Screen0	2154.38	2004.38	1/1/2006	12/31/2018	-3631.27
71	511665.62	2146013.39	2254.63	1999.63	Screen0	2154.63	2004.63	1/1/2006	12/31/2018	-1960.49
72	511578.26	2145798.18	2258.88	2003.88	Screen0	2158.88	2008.88	1/1/2006	12/31/2018	-366.00
73	510790.66	2146074.33	2249.04	1994.04	Screen0	2149.04	1999.04	1/1/2006	12/31/2018	-330.16
293	513708.27	2144477.98	2293.87	2038.87	Screen0	2193.87	2043.87	1/1/2006	12/31/2018	-1315.07
438	507728.89	2145027.70	2243.30	1988.30	Screen0	2143.30	1993.30	1/1/2006	12/31/2018	-1232.88

439	511578.95	2144722.39	2264.00	2009.00	Screen0	2164.00	2014.00	1/1/2006	12/31/2018	-1364.38
443	511477.62	2148131.05	2262.65	2007.65	Screen0	2162.65	2012.65	1/1/2006	12/31/2018	-1438.36
80	512627.18	2147243.51	2263.11	2008.11	Screen0	2163.11	2013.11	1/1/2006	12/31/2018	-14.20
81	512889.79	2147028.54	2275.83	2020.83	Screen0	2175.83	2025.83	1/1/2006	12/31/2018	-2783.74
82	512801.73	2147827.64	2276.02	2021.02	Screen0	2176.02	2026.02	1/1/2006	12/31/2018	-1242.74
83	513122.26	2148165.98	2285.52	2030.52	Screen0	2185.52	2035.52	1/1/2006	12/31/2018	-4970.96
84	512743.78	2147305.07	2269.00	2014.00	Screen0	2169.00	2019.00	1/1/2006	12/31/2018	-2982.58
85	512859.68	2148350.21	2282.51	2027.51	Screen0	2182.51	2032.51	1/1/2006	12/31/2018	-4970.96
203	509040.14	2147425.79	2249.09	1994.09	Screen0	2149.09	1999.09	1/1/2006	12/31/2018	-648.00
263	509915.60	2146319.72	2242.15	1987.15	Screen0	2142.15	1992.15	1/1/2006	12/31/2018	-132.33
274	510207.41	2146012.51	2248.81	1993.81	Screen0	2148.81	1998.81	1/1/2006	12/31/2018	-16.85
275	508544.74	2146687.86	2248.01	1993.01	Screen0	2148.01	1998.01	1/1/2006	12/31/2018	-21.92
312	508486.36	2146810.79	2240.29	1985.29	Screen0	2140.29	1990.29	1/1/2006	12/31/2018	-9.32
329	510615.49	2146381.60	2242.10	1987.10	Screen0	2142.10	1992.10	1/1/2006	12/31/2018	-20.45
197	508923.77	2146872.47	2235.17	1980.17	Screen0	2135.17	1985.17	1/1/2006	12/31/2018	-0.82
373	508165.31	2147394.64	2229.00	1974.00	Screen0	2129.00	1979.00	1/1/2006	12/31/2018	-1.45
36	508224.51	2145458.24	2239.37	1984.37	Screen0	2139.37	1989.37	1/1/2006	12/31/2018	-383.56
277	509915.35	2146780.78	2241.36	1986.36	Screen0	2141.36	1991.36	1/1/2006	12/31/2018	-12.33
375	510031.55	2147610.74	2247.26	1992.26	Screen0	2147.26	1997.26	1/1/2006	12/31/2018	-90.41
399	508544.69	2146810.82	2242.83	1987.83	Screen0	2142.83	1992.83	1/1/2006	12/31/2018	-4.16
415	507611.28	2147271.45	2235.27	1980.27	Screen0	2135.27	1985.27	1/1/2006	12/31/2018	-11.40
106	508223.74	2147148.77	2231.26	1976.26	Screen0	2131.26	1981.26	1/1/2006	12/31/2018	-6.00
352	510964.93	2147242.43	2249.26	1994.26	Screen0	2149.26	1999.26	1/1/2006	12/31/2018	-0.87
25	512832.29	2145860.49	2270.51	2015.51	Screen0	2170.51	2020.51	1/1/2006	12/31/2018	-1369.86
45	511615.83	2146333.02	2252.27	1997.27	Screen0	2152.27	2002.27	1/1/2006	12/31/2018	-1972.60
76	512504.86	2146994.46	2258.37	2003.37	Screen0	2158.37	2008.37	1/1/2006	12/31/2018	-1643.84
212	509186.75	2145858.28	2242.19	1987.19	Screen0	2142.19	1992.19	1/1/2006	12/31/2018	-786.28
213	507291.36	2145119.74	2251.61	1996.61	Screen0	2151.61	2001.61	1/1/2006	12/31/2018	-2160.00
214	508894.71	2146657.30	2236.38	1981.38	Screen0	2136.38	1986.38	1/1/2006	12/31/2018	-1123.29

215	507437.75	2143767.38	2279.89	2024.89	Screen0	2179.89	2029.89	1/1/2006	12/31/2018	-2563.34
216	510673.68	2146627.52	2244.56	1989.56	Screen0	2144.56	1994.56	1/1/2006	12/31/2018	-1919.90
217	510498.57	2146842.57	2249.74	1994.74	Screen0	2149.74	1999.74	1/1/2006	12/31/2018	-2587.33
218	509390.82	2146012.07	2248.92	1993.92	Screen0	2148.92	1998.92	1/1/2006	12/31/2018	-1216.57
219	508603.24	2146319.05	2240.00	1985.00	Screen0	2140.00	1990.00	1/1/2006	12/31/2018	-2446.96
220	507582.97	2145242.80	2242.00	1987.00	Screen0	2142.00	1992.00	1/1/2006	12/31/2018	-3342.82
221	509186.75	2145858.28	2242.19	1987.19	Screen0	2142.19	1992.19	1/1/2006	12/31/2018	-2376.70
222	509536.20	2146842.04	2239.96	1984.96	Screen0	2139.96	1989.96	1/1/2006	12/31/2018	-1440.07
120	508603.01	2146810.85	2241.87	1986.87	Screen0	2141.87	1991.87	1/1/2006	12/31/2018	-32.88
26	501604.02	2146040.44	2231.86	1976.86	Screen0	2131.86	1981.86	1/1/2006	12/31/2018	-1369.86
3	511072.43	2162150.04	2246.08	1991.08	Screen0	2146.08	1996.08	1/1/2006	12/31/2018	-1151.56
6	509813.36	2162705.64	2250.49	1995.49	Screen0	2150.49	2000.49	1/1/2006	12/31/2018	-986.30
100	506497.31	2163377.29	2234.88	1979.88	Screen0	2134.88	1984.88	1/1/2006	12/31/2018	-547.95
308	511265.32	2161215.73	2246.63	1991.63	Screen0	2146.63	1996.63	1/1/2006	12/31/2018	-575.34
447	512241.61	2156771.76	2244.37	1989.37	Screen0	2144.37	1994.37	1/1/2006	12/31/2018	-591.78
465	513024.21	2162784.54	2250.02	1995.02	Screen0	2150.02	2000.02	1/1/2006	12/31/2018	-115.07
506	510490.20	2161227.56	2230.16	1975.16	Screen0	2130.16	1980.16	1/1/2006	12/31/2018	-312.33
507	511947.48	2160767.42	2233.11	1978.11	Screen0	2133.11	1983.11	1/1/2006	12/31/2018	-624.66
17	512318.89	2158840.43	2246.91	1991.91	Screen0	2146.91	1996.91	1/1/2006	12/31/2018	-547.95
265	511386.79	2162663.55	2247.29	1992.29	Screen0	2147.29	1997.29	1/1/2006	12/31/2018	-357.35
266	511078.34	2161996.35	2249.92	1994.92	Screen0	2149.92	1999.92	1/1/2006	12/31/2018	-452.65
267	509862.64	2163157.52	2248.19	1993.19	Screen0	2148.19	1998.19	1/1/2006	12/31/2018	-452.65
268	510262.00	2162810.41	2243.57	1988.57	Screen0	2143.57	1993.57	1/1/2006	12/31/2018	-381.18
269	511386.82	2162620.52	2248.42	1993.42	Screen0	2148.42	1998.42	1/1/2006	12/31/2018	-381.18
270	512056.46	2163374.02	2250.23	1995.23	Screen0	2150.23	2000.23	1/1/2006	12/31/2018	0.00
271	510687.61	2162478.69	2250.70	1995.70	Screen0	2150.70	2000.70	1/1/2006	12/31/2018	-405.00
283	507874.22	2146165.03	2237.00	1982.00	Screen0	2137.00	1987.00	1/1/2006	12/31/2018	-155.52
284	507845.04	2146195.76	2237.76	1982.76	Screen0	2137.76	1987.76	1/1/2006	12/31/2018	-798.90
285	507816.13	2145611.74	2238.89	1983.89	Screen0	2138.89	1988.89	1/1/2006	12/31/2018	-157.81

286	507903.36	2146226.52	2236.43	1981.43	Screen0	2136.43	1986.43	1/1/2006	12/31/2018	-378.74
334	510461.76	2144939.94	2253.64	1998.64	Screen0	2153.64	2003.64	1/1/2006	12/31/2018	-493.15
342	506425.50	2144120.46	2267.17	2012.17	Screen0	2167.17	2017.17	1/1/2006	12/31/2018	-304.11
343	506801.93	2143690.28	2266.01	2011.01	Screen0	2166.01	2016.01	1/1/2006	12/31/2018	-1010.96
410	506039.90	2145924.59	2252.00	1997.00	Screen0	2152.00	2002.00	1/1/2006	12/31/2018	-40.77
411	506445.15	2146287.41	2241.53	1986.53	Screen0	2141.53	1991.53	1/1/2006	12/31/2018	-31.25
412	506269.79	2147393.88	2232.80	1977.80	Screen0	2132.80	1982.80	1/1/2006	12/31/2018	-40.87
484	507436.89	2145857.47	2243.47	1988.47	Screen0	2143.47	1993.47	1/1/2006	12/31/2018	-13.70
498	506386.36	2147609.08	2233.36	1978.36	Screen0	2133.36	1983.36	1/1/2006	12/31/2018	-32.88
509	509741.50	2144690.57	2260.80	2005.80	Screen0	2160.80	2010.80	1/1/2006	12/31/2018	-1364.38
517	508049.95	2144505.32	2252.45	1997.45	Screen0	2152.45	2002.45	1/1/2006	12/31/2018	-782.33
397	507232.13	2147394.24	2231.05	1976.05	Screen0	2131.05	1981.05	1/1/2006	12/31/2018	-18.25
464	507553.51	2145949.74	2235.90	1980.90	Screen0	2135.90	1985.90	1/1/2006	12/31/2018	-81.67
493	507057.51	2146472.07	2238.57	1983.57	Screen0	2138.57	1988.57	1/1/2006	12/31/2018	-6.00
118	507407.04	2147547.99	2229.65	1974.65	Screen0	2129.65	1979.65	1/1/2006	12/31/2018	-19.18
501	507844.72	2146933.45	2230.50	1975.50	Screen0	2130.50	1980.50	1/1/2006	12/31/2018	-5.41
485	502683.34	2144350.04	2240.60	1985.60	Screen0	2140.60	1990.60	1/1/2006	12/31/2018	-7862.40
486	502595.88	2144042.67	2228.64	1973.64	Screen0	2128.64	1978.64	1/1/2006	12/31/2018	-2678.40
487	503033.43	2143827.57	2230.92	1975.92	Screen0	2130.92	1980.92	1/1/2006	12/31/2018	-12960.00
488	502858.51	2143243.54	2228.33	1973.33	Screen0	2128.33	1978.33	1/1/2006	12/31/2018	-10195.20
489	503062.77	2142782.53	2228.11	1973.11	Screen0	2128.11	1978.11	1/1/2006	12/31/2018	-7603.20
107	505015.77	2147608.65	2241.91	1986.91	Screen0	2141.91	1991.91	1/1/2006	12/31/2018	-104.79
500	503645.22	2147393.16	2252.89	1997.89	Screen0	2152.89	2002.89	1/1/2006	12/31/2018	-2.77
460	504900.75	2141614.93	2235.86	1980.86	Screen0	2135.86	1985.86	1/1/2006	12/31/2018	-8.22
305	514722.39	2138368.29	2274.28	2019.28	Screen0	2174.28	2024.28	1/1/2006	12/31/2018	-976.44
340	513784.95	2139514.04	2278.67	2023.67	Screen0	2178.67	2028.67	1/1/2006	12/31/2018	-867.95
77	504551.15	2139770.64	2240.87	1985.87	Screen0	2140.87	1990.87	1/1/2006	12/31/2018	-547.95
239	504375.99	2140293.13	2248.70	1993.70	Screen0	2148.70	1998.70	1/1/2006	12/31/2018	-28.77
240	504375.99	2140293.13	2248.70	1993.70	Screen0	2148.70	1998.70	1/1/2006	12/31/2018	-28.77

243	504230.22	2139862.78	2234.06	1979.06	Screen0	2134.06	1984.06	1/1/2006	12/31/2018	-370.63
344	505837.15	2141559.89	2263.50	2008.50	Screen0	2163.50	2013.50	1/1/2006	12/31/2018	-1420.27
400	504343.94	2140096.40	2242.72	1987.72	Screen0	2142.72	1992.72	1/1/2006	12/31/2018	-65.75
401	504343.94	2140096.40	2242.72	1987.72	Screen0	2142.72	1992.72	1/1/2006	12/31/2018	-65.75
430	504990.98	2142349.57	2234.13	1979.13	Screen0	2134.13	1984.13	1/1/2006	12/31/2018	-7.13
461	504609.34	2140416.13	2246.58	1991.58	Screen0	2146.58	1996.58	1/1/2006	12/31/2018	-684.93
462	504431.38	2140425.30	2242.16	1987.16	Screen0	2142.16	1992.16	1/1/2006	12/31/2018	-821.92
463	504521.85	2140296.23	2247.22	1992.22	Screen0	2147.22	1997.22	1/1/2006	12/31/2018	-804.12
516	504492.87	2139524.73	2243.53	1988.53	Screen0	2143.53	1993.53	1/1/2006	12/31/2018	-54.79
236	504775.48	2140947.91	2242.49	1987.49	Screen0	2142.49	1992.49	1/1/2006	12/31/2018	-32.88
454	506032.32	2142386.77	2251.40	1996.40	Screen0	2151.40	2001.40	1/1/2006	12/31/2018	-23.72
23	514128.17	2163200.33	2261.31	2006.31	Screen0	2161.31	2011.31	1/1/2006	12/31/2018	-367.12
105	515733.85	2162891.21	2262.00	2007.00	Screen0	2162.00	2012.00	1/1/2006	12/31/2018	-95.89
482	516897.13	2165228.32	2280.53	2025.53	Screen0	2180.53	2030.53	1/1/2006	12/31/2018	-1282.19
379	514856.94	2162761.37	2262.96	2007.96	Screen0	2162.96	2012.96	1/1/2006	12/31/2018	-61.51
491	514568.41	2162859.50	2261.56	2006.56	Screen0	2161.56	2011.56	1/1/2006	12/31/2018	-273.97
272	514976.07	2163167.20	2269.52	2014.52	Screen0	2169.52	2019.52	1/1/2006	12/31/2018	-217.50
273	515150.70	2163382.51	2266.42	2011.42	Screen0	2166.42	2016.42	1/1/2006	12/31/2018	-157.50
12	518881.07	2162473.15	2300.41	2045.41	Screen0	2200.41	2050.41	1/1/2006	12/31/2018	-3672.00
226	519083.02	2164369.87	2301.54	2046.54	Screen0	2201.54	2051.54	1/1/2006	12/31/2018	-68.49
364	516081.07	2165596.43	2281.00	2026.00	Screen0	2181.00	2031.00	1/1/2006	12/31/2018	-35.38
369	515818.58	2165934.30	2277.69	2022.69	Screen0	2177.69	2027.69	1/1/2006	12/31/2018	-273.97
374	515556.28	2166057.02	2288.74	2033.74	Screen0	2188.74	2038.74	1/1/2006	12/31/2018	-205.48
378	516723.15	2164336.77	2272.44	2017.44	Screen0	2172.44	2022.44	1/1/2006	12/31/2018	-315.62
384	516898.08	2164213.99	2275.95	2020.95	Screen0	2175.95	2025.95	1/1/2006	12/31/2018	-168.49
387	517052.46	2164247.94	2276.89	2021.89	Screen0	2176.89	2026.89	1/1/2006	12/31/2018	-226.03
392	502855.02	2165251.32	2237.65	1982.65	Screen0	2137.65	1987.65	1/1/2006	12/31/2018	-315.62
393	502796.75	2165312.79	2230.95	1975.95	Screen0	2130.95	1980.95	1/1/2006	12/31/2018	-473.42
404	516540.24	2163648.08	2283.32	2028.32	Screen0	2183.32	2033.32	1/1/2006	12/31/2018	-353.70

477	520102.11	2164924.26	2311.00	2056.00	Screen0	2211.00	2061.00	1/1/2006	12/31/2018	-1.48
483	516023.82	2164459.08	2271.43	2016.43	Screen0	2171.43	2021.43	1/1/2006	12/31/2018	-13.97
490	519403.53	2164339.47	2301.68	2046.68	Screen0	2201.68	2051.68	1/1/2006	12/31/2018	-131.51
511	515604.96	2167043.74	2316.94	2061.94	Screen0	2216.94	2066.94	1/1/2006	12/31/2018	-36.08
513	525382.54	2159797.77	2742.78	2487.78	Screen0	2642.78	2492.78	1/1/2006	12/31/2018	-630.14
515	515672.89	2165964.91	2282.32	2027.32	Screen0	2182.32	2032.32	1/1/2006	12/31/2018	-82.19
62	516902.53	2162587.97	2283.89	2028.89	Screen0	2183.89	2033.89	1/1/2006	12/31/2018	-44.71
164	520047.17	2161942.65	2369.70	2114.70	Screen0	2269.70	2119.70	1/1/2006	12/31/2018	-509.59
242	521066.51	2162374.14	2368.50	2113.50	Screen0	2268.50	2118.50	1/1/2006	12/31/2018	-136.99
336	519490.97	2164308.83	2312.01	2057.01	Screen0	2212.01	2062.01	1/1/2006	12/31/2018	-4.50
368	518892.48	2162712.90	2305.48	2050.48	Screen0	2205.48	2055.48	1/1/2006	12/31/2018	-4.97
370	516220.88	2165633.43	2284.18	2029.18	Screen0	2184.18	2034.18	1/1/2006	12/31/2018	-15.25
376	516459.00	2166457.42	2313.08	2058.08	Screen0	2213.08	2063.08	1/1/2006	12/31/2018	-200.30
394	516751.17	2165535.56	2286.21	2031.21	Screen0	2186.21	2036.21	1/1/2006	12/31/2018	-82.85
395	516751.17	2165535.56	2286.21	2031.21	Screen0	2186.21	2036.21	1/1/2006	12/31/2018	-82.85
396	518936.93	2164769.30	2297.40	2042.40	Screen0	2197.40	2047.40	1/1/2006	12/31/2018	-5.15
471	516840.31	2163691.40	2278.08	2023.08	Screen0	2178.08	2028.08	1/1/2006	12/31/2018	-328.77
472	517160.91	2163568.74	2278.54	2023.54	Screen0	2178.54	2028.54	1/1/2006	12/31/2018	-5.48
473	517190.31	2163292.13	2289.11	2034.11	Screen0	2189.11	2039.11	1/1/2006	12/31/2018	-5.48
474	517248.70	2163169.24	2282.68	2027.68	Screen0	2182.68	2032.68	1/1/2006	12/31/2018	-5.48
478	516053.79	2163536.99	2270.85	2015.85	Screen0	2170.85	2020.85	1/1/2006	12/31/2018	-2465.75
479	516170.49	2163352.66	2270.90	2015.90	Screen0	2170.90	2020.90	1/1/2006	12/31/2018	-1232.88
480	516024.65	2163540.03	2271.57	2016.57	Screen0	2171.57	2021.57	1/1/2006	12/31/2018	-1232.88
481	516199.84	2163106.79	2267.64	2012.64	Screen0	2167.64	2017.64	1/1/2006	12/31/2018	-758.08
497	517332.61	2166796.36	2377.28	2122.28	Screen0	2277.28	2127.28	1/1/2006	12/31/2018	-41.10
514	518529.12	2164707.39	2293.10	2038.10	Screen0	2193.10	2043.10	1/1/2006	12/31/2018	-21.40
199	519112.25	2164277.68	2297.72	2042.72	Screen0	2197.72	2047.72	1/1/2006	12/31/2018	-2.74
280	517742.57	2164645.13	2283.56	2028.56	Screen0	2183.56	2033.56	1/1/2006	12/31/2018	-986.30
88	517823.10	2165687.21	2329.04	2074.04	Screen0	2229.04	2079.04	1/1/2006	12/31/2018	-12.75

143	515791.16	2163997.81	2269.12	2014.12	Screen0	2169.12	2019.12	1/1/2006	12/31/2018	-49.32
403	518879.40	2164062.27	2297.13	2042.13	Screen0	2197.13	2047.13	1/1/2006	12/31/2018	-213.09
476	516984.84	2164890.29	2285.00	2030.00	Screen0	2185.00	2035.00	1/1/2006	12/31/2018	-54.79
508	507429.09	2164760.84	2240.96	1985.96	Screen0	2140.96	1990.96	1/1/2006	12/31/2018	-1.10
492	521978.62	2162298.39	2420.38	2165.38	Screen0	2320.38	2170.38	1/1/2006	12/31/2018	-2195.42
1	515036.54	2160539.20	2262.53	2007.53	Screen0	2162.53	2012.53	1/1/2006	12/31/2018	-480.33
7	517373.97	2160172.46	2273.29	2018.29	Screen0	2173.29	2023.29	1/1/2006	12/31/2018	-356.16
14	509516.44	2156659.46	2236.08	1981.08	Screen0	2136.08	1986.08	1/1/2006	12/31/2018	-420.00
15	510049.42	2157400.51	2235.57	1980.57	Screen0	2135.57	1985.57	1/1/2006	12/31/2018	-4.38
22	511227.48	2147088.92	2254.56	1999.56	Screen0	2154.56	2004.56	1/1/2006	12/31/2018	-994.19
27	515591.93	2158557.12	2270.80	2015.80	Screen0	2170.80	2020.80	1/1/2006	12/31/2018	-16.44
29	512505.85	2154005.60	2255.63	2000.63	Screen0	2155.63	2005.63	1/1/2006	12/31/2018	-208.28
31	511254.39	2150715.89	2249.46	1994.46	Screen0	2149.46	1999.46	1/1/2006	12/31/2018	-273.97
38	513410.90	2152162.01	2283.86	2028.86	Screen0	2183.86	2033.86	1/1/2006	12/31/2018	-7.68
39	513411.02	2152008.33	2289.44	2034.44	Screen0	2189.44	2039.44	1/1/2006	12/31/2018	-263.01
40	508398.39	2147855.80	2232.78	1977.78	Screen0	2132.78	1982.78	1/1/2006	12/31/2018	-319.56
41	508310.91	2147855.76	2232.00	1977.00	Screen0	2132.00	1982.00	1/1/2006	12/31/2018	-1277.81
44	517461.34	2154224.87	2413.60	2158.60	Screen0	2313.60	2163.60	1/1/2006	12/31/2018	-136.99
46	517659.39	2160341.80	2283.74	2028.74	Screen0	2183.74	2033.74	1/1/2006	12/31/2018	-356.16
47	517221.33	2161334.19	2277.58	2022.58	Screen0	2177.58	2027.58	1/1/2006	12/31/2018	-1087.30
48	517235.92	2161318.83	2280.15	2025.15	Screen0	2180.15	2030.15	1/1/2006	12/31/2018	-14.40
50	510956.33	2156614.17	2219.78	1964.78	Screen0	2119.78	1969.78	1/1/2006	12/31/2018	-101.00
63	511660.50	2153943.55	2250.12	1995.12	Screen0	2150.12	2000.12	1/1/2006	12/31/2018	-38.36
64	510053.95	2159721.18	2241.20	1986.20	Screen0	2141.20	1991.20	1/1/2006	12/31/2018	-1683.01
67	512912.18	2156495.60	2248.08	1993.08	Screen0	2148.08	1998.08	1/1/2006	12/31/2018	-273.18
68	516518.80	2161625.54	2270.34	2015.34	Screen0	2170.34	2020.34	1/1/2006	12/31/2018	-941.58
74	510374.32	2160059.48	2245.83	1990.83	Screen0	2145.83	1995.83	1/1/2006	12/31/2018	-0.19
75	509193.89	2160452.27	2238.00	1983.00	Screen0	2138.00	1988.00	1/1/2006	12/31/2018	-2.63
79	511775.07	2157048.09	2238.80	1983.80	Screen0	2138.80	1988.80	1/1/2006	12/31/2018	-38.76

96	510118.26	2154182.37	2243.39	1988.39	Screen0	2143.39	1993.39	1/1/2006	12/31/2018	-1101.37
97	509765.24	2154741.59	2233.34	1978.34	Screen0	2133.34	1983.34	1/1/2006	12/31/2018	-1364.38
101	517357.28	2159345.61	2280.32	2025.32	Screen0	2180.32	2030.32	1/1/2006	12/31/2018	-986.30
102	513111.41	2163073.53	2255.08	2000.08	Screen0	2155.08	2005.08	1/1/2006	12/31/2018	-41.10
110	510843.18	2150900.07	2249.83	1994.83	Screen0	2149.83	1999.83	1/1/2006	12/31/2018	-1610.96
113	510408.77	2150869.07	2247.05	1992.05	Screen0	2147.05	1997.05	1/1/2006	12/31/2018	-1512.33
114	515649.26	2159663.71	2274.20	2019.20	Screen0	2174.20	2024.20	1/1/2006	12/31/2018	-9.86
119	512096.70	2155542.17	2246.59	1991.59	Screen0	2146.59	1996.59	1/1/2006	12/31/2018	-723.29
122	509677.10	2156001.77	2231.46	1976.46	Screen0	2131.46	1981.46	1/1/2006	12/31/2018	-54.79
127	509033.92	2159843.59	2236.59	1981.59	Screen0	2136.59	1986.59	1/1/2006	12/31/2018	-49.32
137	511865.21	2152960.09	2250.03	1995.03	Screen0	2150.03	2000.03	1/1/2006	12/31/2018	-383.56
140	509885.69	2147702.87	2241.04	1986.04	Screen0	2141.04	1991.04	1/1/2006	12/31/2018	-1643.84
141	513608.89	2160215.32	2255.29	2000.29	Screen0	2155.29	2005.29	1/1/2006	12/31/2018	-24.66
144	513179.29	2149948.77	2286.08	2031.08	Screen0	2186.08	2036.08	1/1/2006	12/31/2018	-6027.40
158	514132.92	2160861.21	2256.45	2001.45	Screen0	2156.45	2006.45	1/1/2006	12/31/2018	-5.48
159	510170.64	2159506.09	2245.80	1990.80	Screen0	2145.80	1995.80	1/1/2006	12/31/2018	-1683.01
160	512240.56	2158308.62	2248.39	1993.39	Screen0	2148.39	1998.39	1/1/2006	12/31/2018	-1063.01
168	514865.57	2155851.61	2310.23	2055.23	Screen0	2210.23	2060.23	1/1/2006	12/31/2018	-994.19
169	515214.93	2156343.71	2313.84	2058.84	Screen0	2213.84	2063.84	1/1/2006	12/31/2018	-994.19
170	513262.64	2155542.99	2252.14	1997.14	Screen0	2152.14	2002.14	1/1/2006	12/31/2018	-719.95
171	514719.95	2155697.81	2304.12	2049.12	Screen0	2204.12	2054.12	1/1/2006	12/31/2018	-994.19
196	513987.96	2159908.24	2254.98	1999.98	Screen0	2154.98	2004.98	1/1/2006	12/31/2018	-5.48
202	509563.09	2151145.24	2238.87	1983.87	Screen0	2138.87	1988.87	1/1/2006	12/31/2018	-11.67
223	515128.24	2155452.25	2316.38	2061.38	Screen0	2216.38	2066.38	1/1/2006	12/31/2018	-52.60
225	517455.59	2160157.17	2274.93	2019.93	Screen0	2174.93	2024.93	1/1/2006	12/31/2018	-131.51
227	513780.85	2152574.17	2288.67	2033.67	Screen0	2188.67	2038.67	1/1/2006	12/31/2018	-46.36
244	514135.29	2157848.95	2263.22	2008.22	Screen0	2163.22	2013.22	1/1/2006	12/31/2018	-4.93
251	510537.61	2149910.16	2257.18	2002.18	Screen0	2157.18	2007.18	1/1/2006	12/31/2018	-68.96
254	511117.60	2159761.76	2247.52	1992.52	Screen0	2147.52	1997.52	1/1/2006	12/31/2018	-197.26

255	511584.00	2159571.49	2245.04	1990.04	Screen0	2145.04	1995.04	1/1/2006	12/31/2018	-197.26
257	517844.27	2161977.21	2288.13	2033.13	Screen0	2188.13	2038.13	1/1/2006	12/31/2018	-821.92
258	518054.03	2162017.38	2304.21	2049.21	Screen0	2204.21	2054.21	1/1/2006	12/31/2018	-821.92
264	511399.75	2151392.20	2246.27	1991.27	Screen0	2146.27	1996.27	1/1/2006	12/31/2018	-558.90
278	509733.86	2158860.36	2236.83	1981.83	Screen0	2136.83	1986.83	1/1/2006	12/31/2018	-2.96
281	509059.74	2160661.21	2236.63	1981.63	Screen0	2136.63	1986.63	1/1/2006	12/31/2018	-1602.74
287	510990.62	2152947.25	2240.57	1985.57	Screen0	2140.57	1990.57	1/1/2006	12/31/2018	-1693.15
288	508015.37	2156677.17	2228.93	1973.93	Screen0	2128.93	1978.93	1/1/2006	12/31/2018	-1857.53
291	509267.89	2158214.63	2230.12	1975.12	Screen0	2130.12	1980.12	1/1/2006	12/31/2018	-501.37
294	508588.14	2159662.02	2236.43	1981.43	Screen0	2136.43	1986.43	1/1/2006	12/31/2018	-1324.15
297	512072.91	2156249.11	2238.60	1983.60	Screen0	2138.60	1988.60	1/1/2006	12/31/2018	-509.59
300	510770.65	2160053.56	2249.37	1994.37	Screen0	2149.37	1999.37	1/1/2006	12/31/2018	-1027.40
301	518887.60	2156254.96	2416.15	2161.15	Screen0	2316.15	2166.15	1/1/2006	12/31/2018	-845.74
302	514098.24	2149331.65	2296.55	2041.55	Screen0	2196.55	2046.55	1/1/2006	12/31/2018	-883.56
303	509909.66	2157139.17	2234.92	1979.92	Screen0	2134.92	1984.92	1/1/2006	12/31/2018	-821.92
304	508628.87	2153726.69	2230.92	1975.92	Screen0	2130.92	1980.92	1/1/2006	12/31/2018	-273.97
311	514364.11	2159647.27	2261.57	2006.57	Screen0	2161.57	2011.57	1/1/2006	12/31/2018	-678.08
318	510981.44	2158449.20	2233.54	1978.54	Screen0	2133.54	1983.54	1/1/2006	12/31/2018	-862.19
320	511220.16	2158861.22	2246.21	1991.21	Screen0	2146.21	1996.21	1/1/2006	12/31/2018	-1656.99
322	514078.14	2156404.25	2284.84	2029.84	Screen0	2184.84	2034.84	1/1/2006	12/31/2018	-101.63
323	51591.93	2158557.12	2270.80	2015.80	Screen0	2170.80	2020.80	1/1/2006	12/31/2018	-20.55
324	514153.16	2157369.46	2261.56	2006.56	Screen0	2161.56	2011.56	1/1/2006	12/31/2018	-65.75
325	516308.85	2158576.19	2285.38	2030.38	Screen0	2185.38	2035.38	1/1/2006	12/31/2018	-828.49
326	516096.03	2158658.99	2296.20	2041.20	Screen0	2196.20	2046.20	1/1/2006	12/31/2018	-336.99
327	515504.28	2158812.15	2277.71	2022.71	Screen0	2177.71	2027.71	1/1/2006	12/31/2018	-288.70
328	515125.13	2159153.02	2271.97	2016.97	Screen0	2171.97	2021.97	1/1/2006	12/31/2018	-86.40
330	514223.15	2157326.49	2261.33	2006.33	Screen0	2161.33	2011.33	1/1/2006	12/31/2018	-21.30
331	514048.82	2156619.40	2278.68	2023.68	Screen0	2178.68	2028.68	1/1/2006	12/31/2018	-98.63
332	513932.47	2156311.93	2277.51	2022.51	Screen0	2177.51	2027.51	1/1/2006	12/31/2018	-71.01

333	513816.02	2156127.41	2268.36	2013.36	Screen0	2168.36	2018.36	1/1/2006	12/31/2018	-16.44
338	510201.30	2156831.96	2241.13	1986.13	Screen0	2141.13	1991.13	1/1/2006	12/31/2018	-164.38
341	508278.66	2154587.16	2227.42	1972.42	Screen0	2127.42	1977.42	1/1/2006	12/31/2018	-54.79
345	508715.38	2155693.90	2232.00	1977.00	Screen0	2132.00	1982.00	1/1/2006	12/31/2018	-6.16
348	511806.52	2153544.06	2247.42	1992.42	Screen0	2147.42	1997.42	1/1/2006	12/31/2018	-23.51
355	516621.25	2148476.23	2542.67	2287.67	Screen0	2442.67	2292.67	1/1/2006	12/31/2018	-1101.37
357	515069.27	2156251.37	2310.28	2055.28	Screen0	2210.28	2060.28	1/1/2006	12/31/2018	-3.29
358	514019.84	2156404.21	2281.20	2026.20	Screen0	2181.20	2031.20	1/1/2006	12/31/2018	-11.51
362	510923.43	2153186.96	2244.20	1989.20	Screen0	2144.20	1994.20	1/1/2006	12/31/2018	-50.81
367	511182.40	2149268.14	2254.36	1999.36	Screen0	2154.36	2004.36	1/1/2006	12/31/2018	-24.66
372	513028.52	2156833.78	2256.19	2001.19	Screen0	2156.19	2006.19	1/1/2006	12/31/2018	-191.78
382	509621.19	2151544.85	2237.14	1982.14	Screen0	2137.14	1987.14	1/1/2006	12/31/2018	-394.52
383	514511.27	2161445.53	2261.06	2006.06	Screen0	2161.06	2011.06	1/1/2006	12/31/2018	-42.08
402	512530.88	2159907.16	2246.70	1991.70	Screen0	2146.70	1996.70	1/1/2006	12/31/2018	-177.53
405	512999.44	2156741.55	2255.72	2000.72	Screen0	2155.72	2005.72	1/1/2006	12/31/2018	-795.35
413	515773.12	2161314.41	2270.69	2015.69	Screen0	2170.69	2020.69	1/1/2006	12/31/2018	-690.41
414	512578.91	2157915.42	2247.32	1992.32	Screen0	2147.32	1997.32	1/1/2006	12/31/2018	-331.40
416	516612.47	2158004.76	2284.50	2029.50	Screen0	2184.50	2034.50	1/1/2006	12/31/2018	-438.08
419	516176.69	2156467.49	2331.17	2076.17	Screen0	2231.17	2081.17	1/1/2006	12/31/2018	-661.64
420	514075.66	2159570.19	2260.00	2005.00	Screen0	2160.00	2010.00	1/1/2006	12/31/2018	-575.34
421	514437.33	2159186.26	2264.58	2009.58	Screen0	2164.58	2014.58	1/1/2006	12/31/2018	-517.81
423	508397.59	2149577.08	2224.20	1969.20	Screen0	2124.20	1974.20	1/1/2006	12/31/2018	-710.14
424	508310.19	2149423.35	2231.00	1976.00	Screen0	2131.00	1981.00	1/1/2006	12/31/2018	-1406.07
425	508426.86	2149331.18	2232.34	1977.34	Screen0	2132.34	1982.34	1/1/2006	12/31/2018	-374.30
426	508281.12	2149208.17	2225.73	1970.73	Screen0	2125.73	1975.73	1/1/2006	12/31/2018	-800.68
427	508803.33	2154648.88	2230.41	1975.41	Screen0	2130.41	1980.41	1/1/2006	12/31/2018	-1627.40
428	510494.59	2153696.94	2239.07	1984.07	Screen0	2139.07	1989.07	1/1/2006	12/31/2018	-904.11
432	516260.74	2160217.53	2273.72	2018.72	Screen0	2173.72	2023.72	1/1/2006	12/31/2018	-863.01
433	508306.01	2158490.80	2233.00	1978.00	Screen0	2133.00	1983.00	1/1/2006	12/31/2018	-24.00

437	513218.41	2148285.92	2281.00	2026.00	Screen0	2181.00	2031.00	1/1/2006	12/31/2018	-1261.64
442	508747.50	2149546.50	2234.16	1979.16	Screen0	2134.16	1984.16	1/1/2006	12/31/2018	-1347.95
444	511035.53	2155787.39	2239.52	1984.52	Screen0	2139.52	1989.52	1/1/2006	12/31/2018	-772.60
445	515442.46	2162921.70	2262.13	2007.13	Screen0	2162.13	2012.13	1/1/2006	12/31/2018	-1236.99
446	514831.14	2158722.45	2263.45	2008.45	Screen0	2163.45	2013.45	1/1/2006	12/31/2018	-1150.68
448	509356.51	2155940.13	2224.78	1969.78	Screen0	2124.78	1974.78	1/1/2006	12/31/2018	-761.64
449	517135.64	2159511.38	2283.23	2028.23	Screen0	2183.23	2033.23	1/1/2006	12/31/2018	-606.58
455	512622.71	2153639.90	2253.22	1998.22	Screen0	2153.22	2003.22	1/1/2006	12/31/2018	-473.42
456	512477.01	2153544.51	2256.67	2001.67	Screen0	2156.67	2006.67	1/1/2006	12/31/2018	-1548.05
457	513937.01	2150441.13	2302.95	2047.95	Screen0	2202.95	2052.95	1/1/2006	12/31/2018	-43.20
458	512852.49	2154356.24	2257.38	2002.38	Screen0	2157.38	2007.38	1/1/2006	12/31/2018	-319.56
467	510495.75	2151699.02	2238.79	1983.79	Screen0	2138.79	1988.79	1/1/2006	12/31/2018	-718.03
468	511370.49	2151545.86	2247.17	1992.17	Screen0	2147.17	1997.17	1/1/2006	12/31/2018	-360.00
469	512827.60	2152468.96	2272.57	2017.57	Screen0	2172.57	2022.57	1/1/2006	12/31/2018	-1035.62
505	510838.28	2154192.01	2241.25	1986.25	Screen0	2141.25	1991.25	1/1/2006	12/31/2018	-1421.92
5	513757.16	2156865.07	2258.81	2003.81	Screen0	2158.81	2008.81	1/1/2006	12/31/2018	-305.48
9	516611.71	2158834.67	2279.19	2024.19	Screen0	2179.19	2029.19	1/1/2006	12/31/2018	-2465.75
10	516670.17	2158650.29	2288.74	2033.74	Screen0	2188.74	2038.74	1/1/2006	12/31/2018	-1712.33
11	516582.74	2158650.21	2285.51	2030.51	Screen0	2185.51	2035.51	1/1/2006	12/31/2018	-205.48
18	514672.36	2156865.79	2283.48	2028.48	Screen0	2183.48	2033.48	1/1/2006	12/31/2018	-158.90
34	509088.45	2149946.25	2239.75	1984.75	Screen0	2139.75	1989.75	1/1/2006	12/31/2018	-184.11
43	512828.58	2151085.79	2286.33	2031.33	Screen0	2186.33	2036.33	1/1/2006	12/31/2018	-70.87
57	511457.36	2152498.77	2243.91	1988.91	Screen0	2143.91	1993.91	1/1/2006	12/31/2018	-202.38
58	511194.77	2152836.72	2252.10	1997.10	Screen0	2152.10	2002.10	1/1/2006	12/31/2018	-29.90
59	511748.57	2152990.76	2248.71	1993.71	Screen0	2148.71	1998.71	1/1/2006	12/31/2018	-202.38
60	511748.23	2153513.28	2247.49	1992.49	Screen0	2147.49	1997.49	1/1/2006	12/31/2018	-202.38
65	510109.21	2149531.84	2246.50	1991.50	Screen0	2146.50	1996.50	1/1/2006	12/31/2018	-70.46
78	518884.03	2162439.33	2302.78	2047.78	Screen0	2202.78	2052.78	1/1/2006	12/31/2018	-190.79
90	511457.36	2152498.77	2243.91	1988.91	Screen0	2143.91	1993.91	1/1/2006	12/31/2018	-181.18

91	511194.77	2152836.72	2252.10	1997.10	Screen0	2152.10	2002.10	1/1/2006	12/31/2018	-297.50
92	511748.57	2152990.76	2248.71	1993.71	Screen0	2148.71	1998.71	1/1/2006	12/31/2018	-181.18
93	511748.23	2153513.28	2247.49	1992.49	Screen0	2147.49	1997.49	1/1/2006	12/31/2018	-181.18
94	512243.61	2153820.99	2247.00	1992.00	Screen0	2147.00	1997.00	1/1/2006	12/31/2018	-328.77
98	512885.73	2152714.90	2263.30	2008.30	Screen0	2163.30	2013.30	1/1/2006	12/31/2018	-18.44
99	513990.16	2157080.40	2256.78	2001.78	Screen0	2156.78	2006.78	1/1/2006	12/31/2018	-45.93
103	511750.21	2150470.31	2262.77	2007.77	Screen0	2162.77	2012.77	1/1/2006	12/31/2018	-2339.73
104	511429.51	2150439.37	2260.52	2005.52	Screen0	2160.52	2010.52	1/1/2006	12/31/2018	-345.21
111	510695.03	2159783.03	2244.03	1989.03	Screen0	2144.03	1994.03	1/1/2006	12/31/2018	-273.97
112	510258.30	2159106.56	2243.78	1988.78	Screen0	2143.78	1993.78	1/1/2006	12/31/2018	-1232.88
123	512058.74	2151278.91	2257.23	2002.23	Screen0	2157.23	2007.23	1/1/2006	12/31/2018	-293.10
124	512128.76	2151208.26	2263.17	2008.17	Screen0	2163.17	2013.17	1/1/2006	12/31/2018	-547.95
125	512680.64	2154159.39	2257.13	2002.13	Screen0	2157.13	2007.13	1/1/2006	12/31/2018	-10.96
131	527174.25	2150486.93	3375.87	3120.87	Screen0	3275.87	3125.87	1/1/2006	12/31/2018	-2821.92
132	510292.36	2150500.16	2254.39	1999.39	Screen0	2154.39	2004.39	1/1/2006	12/31/2018	-3013.70
133	509708.92	2151053.11	2236.28	1981.28	Screen0	2136.28	1986.28	1/1/2006	12/31/2018	-153.42
134	510379.49	2151084.22	2242.59	1987.59	Screen0	2142.59	1992.59	1/1/2006	12/31/2018	-2191.78
145	515648.08	2161016.15	2271.26	2016.26	Screen0	2171.26	2021.26	1/1/2006	12/31/2018	-2130.41
146	516639.17	2160648.20	2276.15	2021.15	Screen0	2176.15	2026.15	1/1/2006	12/31/2018	-355.07
147	516493.24	2160893.96	2264.75	2009.75	Screen0	2164.75	2014.75	1/1/2006	12/31/2018	-3787.40
150	516084.63	2161625.14	2266.10	2011.10	Screen0	2166.10	2016.10	1/1/2006	12/31/2018	-2191.78
151	515968.04	2161661.92	2262.83	2007.83	Screen0	2162.83	2012.83	1/1/2006	12/31/2018	-2191.78
152	515997.21	2161625.06	2268.42	2013.42	Screen0	2168.42	2018.42	1/1/2006	12/31/2018	-235.62
153	512188.02	2149794.39	2270.17	2015.17	Screen0	2170.17	2020.17	1/1/2006	12/31/2018	-2191.78
154	511984.16	2149425.41	2264.00	2009.00	Screen0	2164.00	2014.00	1/1/2006	12/31/2018	-2178.08
155	513114.77	2158462.92	2257.45	2002.45	Screen0	2157.45	2007.45	1/1/2006	12/31/2018	-3939.73
156	513406.21	2158463.14	2253.43	1998.43	Screen0	2153.43	2003.43	1/1/2006	12/31/2018	-547.95
157	513114.10	2159385.05	2257.35	2002.35	Screen0	2157.35	2007.35	1/1/2006	12/31/2018	-547.95
161	516854.87	2160596.14	2279.79	2024.79	Screen0	2179.79	2029.79	1/1/2006	12/31/2018	-804.82

162	515126.33	2157726.81	2268.53	2013.53	Screen0	2168.53	2018.53	1/1/2006	12/31/2018	-131.51
165	516495.78	2158127.60	2288.40	2033.40	Screen0	2188.40	2038.40	1/1/2006	12/31/2018	-608.22
172	513696.55	2159908.01	2253.00	1998.00	Screen0	2153.00	2003.00	1/1/2006	12/31/2018	-104.11
174	511924.10	2152068.76	2251.82	1996.82	Screen0	2151.82	2001.82	1/1/2006	12/31/2018	-298.96
175	509095.96	2152405.22	2229.79	1974.79	Screen0	2129.79	1979.79	1/1/2006	12/31/2018	-253.59
176	511309.57	2155726.08	2241.91	1986.91	Screen0	2141.91	1991.91	1/1/2006	12/31/2018	-28.41
177	511515.19	2153236.50	2249.31	1994.31	Screen0	2149.31	1999.31	1/1/2006	12/31/2018	-288.00
178	511952.79	2152775.72	2250.92	1995.92	Screen0	2150.92	2000.92	1/1/2006	12/31/2018	-493.15
179	511222.42	2155234.24	2247.55	1992.55	Screen0	2147.55	1997.55	1/1/2006	12/31/2018	-2160.00
180	512680.75	2154005.72	2259.38	2004.38	Screen0	2159.38	2009.38	1/1/2006	12/31/2018	-1208.22
181	512825.96	2154774.24	2254.43	1999.43	Screen0	2154.43	2004.43	1/1/2006	12/31/2018	-845.75
182	511661.05	2153082.91	2254.74	1999.74	Screen0	2154.74	2004.74	1/1/2006	12/31/2018	-1208.22
183	514953.24	2155575.05	2308.53	2053.53	Screen0	2208.53	2058.53	1/1/2006	12/31/2018	-676.44
184	512883.60	2155696.40	2249.80	1994.80	Screen0	2149.80	1999.80	1/1/2006	12/31/2018	-894.08
185	515158.08	2154622.37	2326.85	2071.85	Screen0	2226.85	2076.85	1/1/2006	12/31/2018	-1087.40
186	515012.34	2154622.25	2319.86	2064.86	Screen0	2219.86	2069.86	1/1/2006	12/31/2018	-144.99
187	511660.26	2154312.39	2253.86	1998.86	Screen0	2153.86	2003.86	1/1/2006	12/31/2018	-620.38
188	511951.56	2154619.96	2258.69	2003.69	Screen0	2158.69	2008.69	1/1/2006	12/31/2018	-1065.21
189	511660.46	2154005.03	2249.11	1994.11	Screen0	2149.11	1999.11	1/1/2006	12/31/2018	-248.55
190	512184.55	2154927.49	2251.87	1996.87	Screen0	2151.87	2001.87	1/1/2006	12/31/2018	-200.00
191	511661.05	2153082.91	2254.74	1999.74	Screen0	2154.74	2004.74	1/1/2006	12/31/2018	-940.93
192	511952.48	2153236.78	2249.10	1994.10	Screen0	2149.10	1999.10	1/1/2006	12/31/2018	-940.93
193	511806.72	2153236.69	2251.93	1996.93	Screen0	2151.93	2001.93	1/1/2006	12/31/2018	-681.73
194	511660.95	2153236.59	2251.74	1996.74	Screen0	2151.74	2001.74	1/1/2006	12/31/2018	-739.73
198	513116.45	2156157.63	2245.22	1990.22	Screen0	2145.22	1995.22	1/1/2006	12/31/2018	-32.88
200	513640.76	2156619.08	2255.43	2000.43	Screen0	2155.43	2005.43	1/1/2006	12/31/2018	-79.45
201	511807.12	2152621.95	2253.64	1998.64	Screen0	2153.64	2003.64	1/1/2006	12/31/2018	-136.99
233	516244.43	2158908.09	2275.19	2020.19	Screen0	2175.19	2025.19	1/1/2006	12/31/2018	-261.78
234	516465.58	2159283.29	2272.01	2017.01	Screen0	2172.01	2022.01	1/1/2006	12/31/2018	-349.04

235	516803.29	2159655.52	2275.30	2020.30	Screen0	2175.30	2025.30	1/1/2006	12/31/2018	-261.78
241	521101.55	2162309.64	2382.11	2127.11	Screen0	2282.11	2132.11	1/1/2006	12/31/2018	-273.97
250	515881.01	2161231.52	2264.81	2009.81	Screen0	2164.81	2014.81	1/1/2006	12/31/2018	-157.95
253	513988.01	2159846.76	2254.64	1999.64	Screen0	2154.64	2004.64	1/1/2006	12/31/2018	-8.22
259	514573.09	2157080.86	2272.53	2017.53	Screen0	2172.53	2022.53	1/1/2006	12/31/2018	-187.95
276	513990.81	2156250.50	2281.58	2026.58	Screen0	2181.58	2031.58	1/1/2006	12/31/2018	-33.05
279	509324.97	2149276.30	2238.71	1983.71	Screen0	2138.71	1988.71	1/1/2006	12/31/2018	-405.89
313	513080.06	2154092.06	2266.84	2011.84	Screen0	2166.84	2016.84	1/1/2006	12/31/2018	-98.63
314	512955.76	2152622.74	2259.61	2004.61	Screen0	2159.61	2009.61	1/1/2006	12/31/2018	-54.54
315	509949.42	2148474.40	2246.00	1991.00	Screen0	2146.00	1996.00	1/1/2006	12/31/2018	-39.45
316	510604.48	2150242.16	2248.41	1993.41	Screen0	2148.41	1998.41	1/1/2006	12/31/2018	-144.00
317	510595.76	2150186.82	2250.52	1995.52	Screen0	2150.52	2000.52	1/1/2006	12/31/2018	-1150.68
319	515301.12	2157819.17	2273.05	2018.05	Screen0	2173.05	2023.05	1/1/2006	12/31/2018	-164.38
347	511960.79	2149477.65	2264.88	2009.88	Screen0	2164.88	2014.88	1/1/2006	12/31/2018	-282.41
349	509293.32	2148461.75	2244.40	1989.40	Screen0	2144.40	1994.40	1/1/2006	12/31/2018	-41.59
353	509243.80	2148378.74	2239.64	1984.64	Screen0	2139.64	1989.64	1/1/2006	12/31/2018	-10.37
359	508893.41	2149294.53	2233.12	1978.12	Screen0	2133.12	1983.12	1/1/2006	12/31/2018	-230.89
360	509424.81	2147945.45	2243.46	1988.46	Screen0	2143.46	1993.46	1/1/2006	12/31/2018	-216.78
361	509911.91	2147739.76	2240.15	1985.15	Screen0	2140.15	1990.15	1/1/2006	12/31/2018	-197.26
363	508890.14	2155939.89	2222.17	1967.17	Screen0	2122.17	1972.17	1/1/2006	12/31/2018	-51.12
417	514281.24	2157572.43	2270.84	2015.84	Screen0	2170.84	2020.84	1/1/2006	12/31/2018	-71.01
418	514281.24	2157572.43	2270.84	2015.84	Screen0	2170.84	2020.84	1/1/2006	12/31/2018	-71.01
19	508888.44	2159382.46	2238.71	1983.71	Screen0	2138.71	1988.71	1/1/2006	12/31/2018	-323.29
21	508888.44	2159382.46	2238.71	1983.71	Screen0	2138.71	1988.71	1/1/2006	12/31/2018	-90.41
130	509564.54	2148409.64	2247.86	1992.86	Screen0	2147.86	1997.86	1/1/2006	12/31/2018	-2.74
173	509767.20	2151114.61	2240.02	1985.02	Screen0	2140.02	1990.02	1/1/2006	12/31/2018	-8.68
388	513069.96	2159965.95	2246.70	1991.70	Screen0	2146.70	1996.70	1/1/2006	12/31/2018	-34.44
13	510031.12	2148379.16	2240.35	1985.35	Screen0	2140.35	1990.35	1/1/2006	12/31/2018	-54.79
33	510788.59	2149547.61	2255.47	2000.47	Screen0	2155.47	2005.47	1/1/2006	12/31/2018	-328.77

37	513494.29	2157602.57	2259.51	2004.51	Screen0	2159.51	2009.51	1/1/2006	12/31/2018	-547.95
51	512969.43	2157940.28	2253.82	1998.82	Screen0	2153.82	2003.82	1/1/2006	12/31/2018	-460.80
55	512882.22	2157632.85	2250.05	1995.05	Screen0	2150.05	2000.05	1/1/2006	12/31/2018	-349.96
66	513523.48	2157541.11	2259.65	2004.65	Screen0	2159.65	2009.65	1/1/2006	12/31/2018	-410.96
69	517896.05	2159724.20	2297.74	2042.74	Screen0	2197.74	2047.74	1/1/2006	12/31/2018	-246.58
245	513901.78	2158309.82	2257.98	2002.98	Screen0	2157.98	2007.98	1/1/2006	12/31/2018	-21.45
246	511891.76	2156894.48	2251.22	1996.22	Screen0	2151.22	2001.22	1/1/2006	12/31/2018	-2.74
247	510201.30	2156831.96	2241.13	1986.13	Screen0	2141.13	1991.13	1/1/2006	12/31/2018	-2.74
248	509533.67	2151637.02	2235.02	1980.02	Screen0	2135.02	1985.02	1/1/2006	12/31/2018	-8.04
252	512387.00	2157263.65	2253.46	1998.46	Screen0	2153.46	2003.46	1/1/2006	12/31/2018	-32.88
337	511048.79	2153174.74	2242.45	1987.45	Screen0	2142.45	1992.45	1/1/2006	12/31/2018	-46.25
366	518456.64	2161516.77	2312.82	2057.82	Screen0	2212.82	2062.82	1/1/2006	12/31/2018	-8.22
381	512031.33	2157395.58	2254.89	1999.89	Screen0	2154.89	2004.89	1/1/2006	12/31/2018	-65.75
385	513459.25	2157688.59	2261.04	2006.04	Screen0	2161.04	2011.04	1/1/2006	12/31/2018	-363.84
386	513494.29	2157602.57	2259.51	2004.51	Screen0	2159.51	2009.51	1/1/2006	12/31/2018	-71.23
398	510113.00	2147955.04	2247.36	1992.36	Screen0	2147.36	1997.36	1/1/2006	12/31/2018	-109.59
435	512386.94	2157355.86	2243.04	1988.04	Screen0	2143.04	1993.04	1/1/2006	12/31/2018	-19.05
42	510672.68	2148318.06	2248.47	1993.47	Screen0	2148.47	1998.47	1/1/2006	12/31/2018	-9.25
53	509593.44	2148901.45	2246.30	1991.30	Screen0	2146.30	1996.30	1/1/2006	12/31/2018	-75.45
54	509855.74	2149147.49	2246.13	1991.13	Screen0	2146.13	1996.13	1/1/2006	12/31/2018	-53.65
115	509398.34	2148378.82	2241.61	1986.61	Screen0	2141.61	1991.61	1/1/2006	12/31/2018	-47.95
148	512188.02	2149794.39	2270.17	2015.17	Screen0	2170.17	2020.17	1/1/2006	12/31/2018	-2191.78
149	511984.16	2149425.41	2264.00	2009.00	Screen0	2164.00	2014.00	1/1/2006	12/31/2018	-2178.08
321	510963.54	2149541.56	2257.07	2002.07	Screen0	2157.07	2007.07	1/1/2006	12/31/2018	-50.40
346	510582.23	2148419.43	2252.50	1997.50	Screen0	2152.50	2002.50	1/1/2006	12/31/2018	-9.87
350	511156.22	2149160.54	2255.07	2000.07	Screen0	2155.07	2005.07	1/1/2006	12/31/2018	-9.87
351	516694.82	2160350.09	2269.47	2014.47	Screen0	2169.47	2019.47	1/1/2006	12/31/2018	-16.00
354	515364.51	2158667.58	2268.19	2013.19	Screen0	2168.19	2018.19	1/1/2006	12/31/2018	-51.50
371	509109.71	2148261.88	2241.71	1986.71	Screen0	2141.71	1991.71	1/1/2006	12/31/2018	-150.00

390	510214.87	2148308.56	2249.56	1994.56	Screen0	2149.56	1999.56	1/1/2006	12/31/2018	-240.00
89	500874.50	2154616.02	2227.39	1972.39	Screen0	2127.39	1977.39	1/1/2006	12/31/2018	-225.00
95	511280.07	2156279.33	2237.44	1982.44	Screen0	2137.44	1987.44	1/1/2006	12/31/2018	-179.26
109	515618.72	2161262.03	2269.15	2014.15	Screen0	2169.15	2019.15	1/1/2006	12/31/2018	-1152.00
128	513405.37	2159600.42	2257.60	2002.60	Screen0	2157.60	2007.60	1/1/2006	12/31/2018	-691.20
129	520779.33	2158746.78	2508.48	2253.48	Screen0	2408.48	2258.48	1/1/2006	12/31/2018	-388.80
204	513494.43	2157418.14	2256.74	2001.74	Screen0	2156.74	2006.74	1/1/2006	12/31/2018	-1512.00
205	512503.88	2156833.41	2252.03	1997.03	Screen0	2152.03	2002.03	1/1/2006	12/31/2018	-1512.00
206	514140.55	2151148.24	2321.80	2066.80	Screen0	2221.80	2071.80	1/1/2006	12/31/2018	-691.20
207	511717.06	2156617.73	2249.46	1994.46	Screen0	2149.46	1999.46	1/1/2006	12/31/2018	-3780.00
208	505071.65	2156276.51	2231.30	1976.30	Screen0	2131.30	1981.30	1/1/2006	12/31/2018	-1512.00
209	512067.05	2156279.84	2242.10	1987.10	Screen0	2142.10	1992.10	1/1/2006	12/31/2018	-691.20
210	516729.39	2157636.01	2291.90	2036.90	Screen0	2191.90	2041.90	1/1/2006	12/31/2018	-2304.00
211	512502.96	2158155.12	2255.35	2000.35	Screen0	2155.35	2005.35	1/1/2006	12/31/2018	-6642.00
229	509621.44	2151083.80	2237.70	1982.70	Screen0	2137.70	1987.70	1/1/2006	12/31/2018	-346.73
230	509767.13	2151237.56	2240.88	1985.88	Screen0	2140.88	1990.88	1/1/2006	12/31/2018	-346.73
231	509737.99	2151206.81	2241.74	1986.74	Screen0	2141.74	1991.74	1/1/2006	12/31/2018	-346.73
232	509679.63	2151298.98	2245.23	1990.23	Screen0	2145.23	1995.23	1/1/2006	12/31/2018	-346.73
260	511109.19	2149762.95	2253.59	1998.59	Screen0	2153.59	2003.59	1/1/2006	12/31/2018	-518.40
261	510925.84	2149197.28	2253.40	1998.40	Screen0	2153.40	2003.40	1/1/2006	12/31/2018	-864.00
262	510855.94	2149065.08	2258.28	2003.28	Screen0	2158.28	2008.28	1/1/2006	12/31/2018	-864.00
377	515592.89	2157450.57	2286.17	2031.17	Screen0	2186.17	2036.17	1/1/2006	12/31/2018	-460.27
470	509180.01	2159105.97	2234.24	1979.24	Screen0	2134.24	1984.24	1/1/2006	12/31/2018	-443.84
16	509302.30	2148009.93	2247.19	1992.19	Screen0	2147.19	1997.19	1/1/2006	12/31/2018	-273.97
20	511254.31	2150838.84	2249.06	1994.06	Screen0	2149.06	1999.06	1/1/2006	12/31/2018	-279.45
28	515592.94	2157389.09	2289.31	2034.31	Screen0	2189.31	2039.31	1/1/2006	12/31/2018	-136.99
49	517659.39	2160341.80	2283.74	2028.74	Screen0	2183.74	2033.74	1/1/2006	12/31/2018	-356.16
108	508806.19	2148778.10	2233.54	1978.54	Screen0	2133.54	1983.54	1/1/2006	12/31/2018	-54.79
116	512473.73	2158278.05	2250.84	1995.84	Screen0	2150.84	2000.84	1/1/2006	12/31/2018	-35.62

249	515831.51	2157881.11	2282.42	2027.42	Screen0	2182.42	2032.42	1/1/2006	12/31/2018	-15.00
389	514106.22	2157756.71	2265.28	2010.28	Screen0	2165.28	2015.28	1/1/2006	12/31/2018	-281.45
409	510000.85	2150377.05	2254.05	1999.05	Screen0	2154.05	2004.05	1/1/2006	12/31/2018	-49.32
429	509971.86	2150069.66	2255.23	2000.23	Screen0	2155.23	2005.23	1/1/2006	12/31/2018	-19.73
453	509506.29	2148286.67	2243.40	1988.40	Screen0	2143.40	1993.40	1/1/2006	12/31/2018	-9.91
8	517332.79	2160575.08	2279.33	2024.33	Screen0	2179.33	2029.33	1/1/2006	12/31/2018	-794.52
30	512068.66	2153882.34	2250.47	1995.47	Screen0	2150.47	2000.47	1/1/2006	12/31/2018	-262.95
35	508980.59	2149915.46	2240.09	1985.09	Screen0	2140.09	1990.09	1/1/2006	12/31/2018	-4.56
380	508233.53	2164005.04	2243.08	1988.08	Screen0	2143.08	1993.08	1/1/2006	12/31/2018	-854.79
512	510138.06	2165592.08	2248.57	1993.57	Screen0	2148.57	1998.57	1/1/2006	12/31/2018	-1491.29
24	508594.28	2165099.47	2242.53	1987.53	Screen0	2142.53	1992.53	1/1/2006	12/31/2018	-273.97