

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO DE CONTAMINACIÓN
DEL ACUÍFERO DE TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO.

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA

MA. DE LOURDES VÁZQUEZ CASTRO

Bajo la supervisión de:

DIRECTOR DE TESIS: DR. MAURICIO CARRILLO GARCÍA
CO-DIRECTOR: DR. LÁZARO RAYMUNDO REYES GUTIÉRREZ



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES



APROBADA

Chapingo, Estado de México Diciembre de 2020.



ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO DE TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO.

Tesis realizada por **Ma. de Lourdes Vázquez Castro** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:



Ph. D. Mauricio Carrillo García

CO-DIRECTOR:



Dr. Lázaro Raymundo Reyes Gutiérrez

ASESOR:



Dr. Aurelio Reyes Ramírez.

CONTENIDO

CONTENIDO	III
LISTA DE CUADROS	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
DEDICATORIA	XI
AGRADECIMIENTOS	XII
DATOS BIOGRÁFICOS.....	XIII
RESUMEN GENERAL	XIV
GENERAL ABSTRACT	XV
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Problemática	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo de este estudio	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
1.5. Hipótesis	5
1.6. Estructura de la tesis	6
2. REVISIÓN DE LITERATURA	8
2.1. Métodos para evaluar vulnerabilidad acuífera	9
2.2. Mapas de vulnerabilidad con base en índices	13
2.3. Acuífero de Texcoco	17
2.3.1. Localización.....	17
2.3.2. Clima	21
2.3.3. Geología General del acuífero	22

2.3.4. Litología e Hidrogeología.....	27
2.3.5. Comportamiento hidráulico del acuífero	28
2.4. Estudios en la zona del acuífero de Texcoco.....	32
2.5. Método geoelectrico de resistividad.....	35
2.6. Infiltración básica y Conductividad hidráulica Saturada	53
2.7. Comentarios generales.....	63
2.8. Literatura Citada	64
3. ZONIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD PROTECTORA Y VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO DE TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO.....	71
3.1. Resumen.....	71
3.2. Abstract.....	72
3.3. Introducción	73
3.4. Materiales y Métodos.....	78
3.5. Resultados y Discusión.....	84
3.6. Conclusiones	95
3.7. Literatura Citada	96
4. ESTIMACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN EL ÁREA DE INFLUENCIA AL ACUÍFERO DE TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO.	99
4.1. Resumen.....	99
4.2. Abstract.....	100
4.3. Introducción	101
4.4. Materiales y métodos	102
4.5. Resultados y Análisis de resultados.....	109
4.6. Conclusiones.....	117
4.7. Literatura Citada.....	118

5. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA EN CERRO COLORADO, MUNICIPIO DE ATOTONILCO EL GRANDE, ESTADO DE HIDALGO	120
5.1. Carta de aceptación de Academia Journals.....	120
5.2. Resumen.....	121
5.3. Abstract.....	122
5.4. Introducción	123
5.5. Marco Físico	124
5.6. Descripción del Método.....	126
5.7. Presentación de Resultados y Discusión	128
5.8. Comentarios Finales	136
5.9. Literatura Citada	137
6. CONCLUSIONES GENERALES.....	139
ANEXO A. NIVEL PIEZOMÉTRICO DE POZOS (CONAGUA; 2017).....	143
ANEXO B. ESTRATIGRAFÍA DE POZOS	145

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Definiciones del término vulnerabilidad de acuíferos (intrínseca y específica). Fuente (Vargas 2010, Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo Territorial. Colombia).....	10
Cuadro 2. Población de los municipios dentro de los límites del acuífero de Texcoco (INEGI, 2015).....	20
Cuadro 3. Recopilación de algunos trabajos realizados en la zona del acuífero de Texcoco	33
Cuadro 4. Índice de la conductancia longitudinal (capacidad protectora). (Fuente: Oladapo y Akintorinwa, 2007)	81
Cuadro 5. Vulnerabilidad del Acuífero según el Método AVI. (Fuente: Prashant et al., 2020).....	82
Cuadro 6. Resultados de los Sondeos Eléctricos Verticales.	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelos basados en índices para evaluación de vulnerabilidad acuífera. Según Prashant et al., 2020.	14
Figura 2. Representación de parámetros de Dar Zarrouk.....	16
Figura 3. Localización de área del acuífero de Texcoco.....	18
Figura 4. Acuíferos colindantes al acuífero Texcoco.	19
Figura 5. Clima en la superficie del acuífero de Texcoco. (Fuente: CENAPRED, 2019).	21
Figura 6. Geología General del acuífero de Texcoco (Modificado de INEGI, 2017; Escobar-Villagrán, 2012).	24
Figura 7. Geología estructural del acuífero de Texcoco, Estado de México. (Modificado de INEGI, 2017; Escobar-Villagrán, 2012).	26
Figura 8. Profundidad del nivel de agua y ubicación de pozos de agua. a) Nivel estático, 2000, b) Nivel estático, 2019.	29
Figura 9. Elevación del nivel de agua (msnm), del año 2000 del acuífero de Texcoco, obtenidos de la base de CONAGUA, 2018.	30
Figura 10. Elevación del nivel de agua (msnm), del año 2019 del acuífero de Texcoco, obtenidos de la base de CONAGUA, 2018.	31
Figura 11. Evolución del nivel estático ($m \cdot año^{-1}$), del periodo 1985-2019.....	32
Figura 12. Perfil estratigráfico en la zona de San Salvador Atenco, donde predominan materiales lacustres.	35
Figura 13. Esquema de un arreglo cuadripolar. Fuente (Custodio y Llamas, 2001).	39
Figura 14. Equipos de prospección eléctrica resistiva, a) Georesistivímetro SAS 300B, b) Tomógrafo Terrameter LS 100.....	42

Figura 15. Esquema del arreglo Schlumberger.....	44
Figura 16. Esquema de arreglo interelectrónico tipo gradiente.....	44
Figura 17. Diagrama de flujo para obtener pseudosecciones de resistividad aparente con modelo de inversión. (Fuente: Briceño y Avellaneda, 2001).	47
Figura 18. Espesor (m), de la capa superior del acuífero de Texcoco.....	48
Figura 19. Distribución de las resistividades aparentes de la capa superior del suelo, área del acuífero de Texcoco.....	50
Figura 20. Espesor de la capa base del acuífero (m), considerando la profundidad máxima lograda en cada estudio geoelectrico.....	51
Figura 21. Resistividad de la capa base del acuífero (ohm·m), considerando la profundidad máxima lograda en cada estudio geoelectrico.....	52
Figura 22. Curva de Infiltración tipo exponencial.	55
Figura 23. Delimitación del área de estudio y ubicación de los puntos de muestreo en el acuífero de Texcoco.....	61
Figura 24. Localización del acuífero de Texcoco, indicando la ubicación de los SEV de prospección geoelectrica y pozos de la zona de estudio.....	76
Figura 25. Esquema geológico del área de estudio mostrando ubicación de SEV's y perfiles geoelectricos (Modificado INEGI, 2017; Escobar-Villagrán y Palacios-Vélez, 2012).	77
Figura 26. Mapa potenciométrico para 2017 (msnm).	85
Figura 27. Evolución del nivel piezométrico para 2017-2018 (m).	85
Figura 28. Clasificación de suelo por textura, zona del acuífero de Texcoco. ..	86
Figura 29. Mapa de zonas permeables en el acuífero de Texcoco, Estado de México.	88

Figura 30. Distribución de la resistividad y espesores: a) Resistividad de la capa superficial, b) Espesor de la capa superficial, c) Resistividad de la capa base del acuífero, d) Espesor de la capa base del acuífero.	89
Figura 31. Perfiles geoelectricos de la zona del acuífero de Texcoco.	91
Figura 32. a) Distribución de la resistencia hidráulica ($C, m \cdot d^{-1}$). b) Distribución de la conductancia longitudinal unitaria ($S, mhos$).....	94
Figura 33. Ubicación del acuífero de Texcoco, Estado de México.....	102
Figura 34. Delimitación del área de estudio y ubicación de los sitios de medición.	104
Figura 35. Arreglo interelectrónico tipo gradiente.	108
Figura 36. Distribución espacial de K_{fs} técnica del permeámetro Guelph (profundidad 60 cm).....	110
Figura 37. Distribución espacial de K_{fs} (Kostiakov). Lámina infiltrada contra tiempo (profundidad 15 cm).	112
Figura 38. Distribución espacial de K_{fs} considerando el 10% de tiempo antes de que ocurra la infiltración básica (profundidad 15 cm).	113
Figura 39. Distribución espacial de K_{fs} , criterio PROSAP, (profundidad 15 cm).	113
Figura 40. Distribución espacial de K_{fs} (Horton).....	114
Figura 41. Tomografía eléctrica vertical (TER), Tezoyuca, Estado de México.	115
Figura 42. Tomografía eléctrica vertical (TER), Papalotla, Estado de México.	116
Figura 43. Ubicación del sitio de estudio localidad Cerro Colorado, Estado de Hidalgo (Fuente: Google earth, 2017).	125
Figura 44. Cortes de perfiles en Cerro Colorado, Estado de Hidalgo.	130
Figura 45. Perfil geoelectrico AA' (SEV 1, 4, 3, 5).	131
Figura 46. Perfil geoelectrico BB' (SEV 8, 3 y 7).....	132

Figura 47. Perfil geoelectrico CC' (SEV 2 y 6). 133
Figura 48. Perfil geoelectrico DD' (SEV 7 y 6). 134
Figura 49. Perfil 2 de tomografía geoelectrica. 135
Figura 50. Perfil 3 de tomografía geoelectrica. 136

DEDICATORIA

A mi esposo y compañero de vida Agustín Rodríguez Ponce y mis hijas Lulú y Rosy, por haberme apoyado en todo momento. Su amor y paciencia me permitió superar esta etapa de estudio que me ha dejado una gran satisfacción personal y profesional.

A mis padres Jesús Vázquez García y Rosa Ma. Castro por inspirar el deseo de superación y la idea de que se puede lograr cualquier objetivo planteado.

A mis hermanos que son fuente de inspiración.

A mis compañeros de Posgrado que hicieron de las jornadas de trabajo y estudio, sesiones divertidas y agradables.

A todas aquellas personas que han colaborado y me han brindado su apoyo, incluso invirtiendo horas fuera de su horario de trabajo para facilitar el uso de equipo y herramientas que me permitieron el análisis de muestras y la recopilación de información.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del agua que me abrió las puertas y me dio la oportunidad de continuar con mis estudios de posgrado.

A mi director de tesis Ph D. Mauricio Carrillo García por el apoyo que me brindo a lo largo de mi formación profesional en este posgrado, por compartir sus conocimientos y guiarme para lograr finalizar este trabajo de tesis.

Al Dr. Lázaro Raymundo Reyes Gutiérrez, por su apoyo constante y por compartir su experiencia y conocimientos en diversos temas, que me permitieron desarrollar y llevar a buen término este trabajo de investigación

Al Dr. Aurelio Reyes Ramírez, por sus consejos y compartir su conocimiento y anécdotas en la aplicación de técnicas en los trabajos de campo.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca económica otorgada en esta etapa de estudio del posgrado IAUIA

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos Personales

Nombre: Ma. de Lourdes Vázquez Castro

Fecha de nacimiento: 16 de diciembre 1962

Lugar de nacimiento: Ciudad Victoria, Tamaulipas, México

Profesión: Ingeniero Químico industrial
Maestra en Ingeniería Ambiental

Cédula Profesional: Ingeniero Químico Industrial Cédula 6817418
Maestría en Ingeniería Ambiental Cédula 09127379

Desarrollo profesional:

En docencia, como profesora investigadora de tiempo completo.

En el área industrial, en empresas de producción y síntesis de productos químicos, área de investigación y desarrollo, control de calidad y empresas dedicadas al tratamiento de agua residual.

Licenciatura: Escuela Superior de Ingeniería Química (ESIQIE), IPN.

Maestría: Universidad del Noreste, Tampico Tamaulipas

RESUMEN GENERAL¹

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO DE TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

México, enfrenta problemas de disponibilidad de agua y contaminación, los cuales se agravan por el consumo y uso desmedido de este recurso natural. El agua subterránea presenta una gran cantidad de problemas debido al descenso continuo de sus niveles y en algunos sectores del acuífero existe un riesgo elevado a la contaminación, impactando de manera negativa el suministro de este recurso. De esto deriva la importancia de la gestión y manejo sustentable de este recurso hídrico. El acuífero de Texcoco es el principal recurso de agua de al menos 13 municipios en la parte oriente del Valle de México, es la principal fuente de abastecimiento de una población cercana a los 3,200,000 habitantes. El crecimiento económico de una región, así como el bienestar de la población depende fuertemente de la posibilidad de alcanzar un manejo sustentable. El objetivo de este trabajo fue determinar el riesgo de contaminación del agua subterránea, generando y analizando mapas de riesgo con base a los parámetros de Dar Zarrouk y el método AVI. La vulnerabilidad intrínseca se determinó con base a variables que caracterizan al acuífero en estudio como; profundidad del nivel del agua, litología, tipo de acuífero, topografía, características de la zona no saturada y su conductividad hidráulica saturada. La información para el desarrollo de esta metodología se adquirió a través de mediciones en campo y recopilación de datos, abarcando la superficie del terreno, correspondiente al área estudio. El mapa de vulnerabilidad y riesgo a la contaminación se elaboró con base a las zonas susceptibles de infiltración, a partir de datos de la conductividad hidráulica, K_{fs} ($m \cdot d^{-1}$) y espesor h (m) de la zona no saturada, se obtuvieron valores de la resistencia hidráulica $C=1.4$ a 3.9 días, que muestran un cierto grado de vulnerabilidad, la cual se clasifico conforme a los niveles del modelo.

Palabras clave: acuífero, mapa de riesgo, infiltración, vulnerabilidad intrínseca.

¹ Tesis de Doctorado en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor : Ma. de Lourdes Vázquez Castro.

Director : Dr. Mauricio Carrillo García.

GENERAL ABSTRACT¹

ANALYSIS OF VULNERABILITY AND RISK TO CONTAMINATION OF THE AQUIFER OF TEXCOCO, STATE OF MEXICO

Mexico faces problems about water availability and pollution, which are aggravated by the excessive consumption and use of this natural resource. Groundwater presents many problems due to the continuous decrease in its levels, and in some sectors of the aquifer there exists a high risk of contamination, that negatively impacts the supply of this resource. The importance of sustainable management and handling of this water resource derives from this. The Texcoco aquifer is one of the main water resources of at least 13 municipalities in the eastern part of the Valley of Mexico, it is the main source of supply for a population of about 3,200,000 inhabitants. The economic growth of a region as well as the well-being of the population strongly depends on the possibility of achieving sustainable management. The objective of this work was to determine the risk of groundwater contamination, generating and analyzing risk maps based on the Dar Zarrouk parameters and the AVI method. The intrinsic vulnerability was determined based on variables that characterize the aquifer under study such as water level depth, lithology, type of aquifer, topography, characteristics of the unsaturated zone and hydraulic conductivity. The information for the application of this methodology was obtained through field measurements and data collection, covering the surface of the land, corresponding to the study area. The map of vulnerability and risk to contamination was elaborated based on the areas susceptible to infiltration; from data of the hydraulic conductivity, K_{fs} ($m \cdot d^{-1}$) and thickness h (m) of the unsaturated area, values of hydraulic resistance $C = 1.4$ to 3.9 days were obtained, and they show a certain degree of vulnerability, which was classified according to the levels of the model.

Keywords: aquifer, risk map, infiltration, intrinsic vulnerability

¹ Doctoral thesis, Postgraduate in Agricultural Engineering and Integrated Use of Water, Universidad Autónoma Chapingo.

Author : Ma. de Lourdes Vázquez Castro.

Advisor : Dr. Mauricio Carrillo García.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Antecedentes

El agua es indispensable para la vida, permite realizar diversos procesos biológicos y es el representante de uno de los ciclos geoquímicos más importantes del planeta. Cubre las tres cuartas partes de nuestro globo terráqueo y es el eje fundamental para el desarrollo económico y social de cualquier país. El crecimiento de la población ha provocado la explotación de los recursos naturales, impactando de manera negativa el recurso agua, el cual se ha contaminado a través del tiempo y con ello se ha vuelto insuficiente para satisfacer las necesidades del ser humano y la vida en la Tierra.

México recibe alrededor de 1,449,471 hm³ de precipitación cada año. De esta agua, se estima que el 72.15 % presenta el proceso de evapotranspiración, el 21.46 % escurre formando arroyos o ríos y solamente un 6.38 % se infiltra y llega a recargar a los acuíferos, clasificándose como uno de los países con muy baja disponibilidad de agua potable (CONAGUA, 2018). El agua subterránea desempeña un papel de importancia fundamental en el desarrollo socioeconómico de México, el cual se manifiesta en la dimensión del volumen que aporta para ser utilizado por los principales usuarios.

En el censo realizado en el 2017, se determinó que el 39.1% del volumen total concesionado para usos consuntivos (agrícola, consumo público e industrial); es decir, 32,380 millones de metros cúbicos, corresponden a aguas subterráneas. Por tal razón, el agua subterránea se ha convertido en una de las fuentes principales para suministrar agua a los diferentes sectores del país. Para poder aprovechar y hacer uso adecuado de este vital líquido, es importante conocer; la

disponibilidad del agua subterránea, así como la susceptibilidad a contaminarse, por diversas fuentes, las cuales pueden ser de tipo natural o antropogénica (CONAGUA, 2018).

Entre los acuíferos más importantes del país y, en particular, a los pertenecientes a la Cuenca del Valle de México, se encuentra el acuífero de Texcoco, principal recurso de agua potable para al menos 13 municipios de la parte oriente del Valle de México. El desarrollo económico y social de esta región depende de la posibilidad de alcanzar un adecuado uso del agua subterránea y un manejo sustentable del acuífero, el cual se encuentra sobreexplotado (Escobar-Villagrán y Palacios-Vélez, 2012).

1.2. Problemática

El acelerado crecimiento de la población y el desarrollo de actividades económicas han deteriorado la calidad del recurso hídrico de manera significativa, impactando negativamente las fuentes superficiales y subterráneas de agua. Estos recursos naturales, se han utilizado sin considerar un manejo controlado.

El acceso al agua potable se ha visto amenazado debido a un aumento en la demanda para satisfacer una mayor cantidad y variedad de actividades antropogénicas, que traen consigo mayor carga contaminante, sobre todo contaminantes de tipo bioacumulativo, así como, el desperdicio o uso irracional del agua potable (Vrba, 2003; Custodio y Llamas, 2001). Aunado a esto la falta de lluvia, el aumento de las sequías, la desertificación y la baja disponibilidad de fuentes superficiales de agua potable, en varias zonas del país, ha orillado a la población a utilizar grandes cantidades de agua subterránea, provocando la explotación intensiva de diversos acuíferos, hasta el grado de convertirse en un problema de abasto y una amenaza para el desarrollo sustentable.

Debido a la explotación, el acelerado descenso de los niveles del agua subterránea ha traído consigo diversos efectos perjudiciales, como es el caso del acuífero de Texcoco, detectando en los últimos 30 años, que los niveles de agua subterránea han descendido varios metros; identificando niveles estáticos entre 40 y más de 125 m de profundidad con respecto a la superficie del terreno y continúan bajando a un ritmo acelerado, de entre uno a casi cuatro metros en promedio por año (DOF, 2019). Por otra parte, se hacen frecuentes fracturas y asentamientos de terrenos, así como la presencia de sustancias que merman la calidad del agua, como la alta concentración de sales detectadas en pozos ubicados en el ramal Peñón- Texcoco, debido a la explotación intensiva del acuífero por bombeo.

El Valle de Texcoco, ubicado en la parte oriente del Estado de México, es una de las porciones geográficas importantes del centro de la República Mexicana, cuenta con un potencial económico favorable, producto de actividades como la agricultura, minería e industria. Sin embargo, en la región del municipio de Texcoco, se ha generado un polo de crecimiento demográfico que puede contribuir a la alteración de la calidad del agua subterránea por las diversas actividades socioeconómicas que se desarrollan, ocasionando, además, una escasez severa y competencia cada vez creciente, por el uso del agua entre los diferentes sectores. Esta situación, debe tomarse en cuenta para poner en alerta a las autoridades competentes del manejo de los recursos hídricos.

1.3. Justificación

El problema de infiltración de contaminantes ha afectado a los acuíferos que se consideran como una reserva hídrica importante para el abastecimiento de agua potable a las poblaciones que dependen de este recurso. Los mecanismos por los que una sustancia contaminante puede infiltrarse hasta alcanzar el agua subterránea son principalmente por arrastre del contaminante desde la superficie, debido a riego, percolación de agua de lluvias y por flujo inducido de aguas

superficiales contaminadas, ocasionado por una extracción excesiva del agua subterránea. Conocer la vulnerabilidad de un acuífero de ser afectado por factores externos, en una región determinada, es un asunto apremiante para las instituciones relacionadas con el medio ambiente y para organismos relacionados con la explotación del agua subterránea.

Para determinar los niveles de vulnerabilidad del agua subterránea en el acuífero, se pueden aplicar diferentes métodos como DRASTIC, SINTACS, GOD, BGR, AVI, parámetros de Dar Zarrouk, entre otros. Así mismo, estudios recientes han demostrado que con el apoyo de los sistemas de información geográfica (SIG), se logran incorporar y analizar elementos de cada método de evaluación y así generar herramientas que ayuden en la planeación y reordenamiento de zonas con actividades económicas, además permiten identificar fuentes potenciales de contaminación al delimitar áreas con mayor riesgo de contaminación (Pathak y Bhandary, 2020; Jarray et al., 2017).

La región de Texcoco es una zona importante agrícola-ganadera-industrial del Estado de México, cuya única fuente de abastecimiento de agua, es la extracción de agua subterránea, lo que justifica plenamente la realización de estudios tendientes a conocer el grado de vulnerabilidad, que el sistema acuífero presenta ante fuentes antropogénicas de contaminación.

El creciente régimen de extracción no controlado de pozos urbanos, agrícolas e industriales al que está sujeto el sistema acuífero de Texcoco, tal como el del Valle de México, ha provocado entre otras cosas, hundimientos diferenciales del terreno (DOF, 2019; Jiménez, 2005), el secado de pozos tipo noria, además de mermar el flujo de agua de los manantiales de la zona.

Aunque se han realizado estudios de carácter geológico, geofísico, e hidrogeológico por parte de la CNA (anteriormente, Comisión Nacional del Agua), e instituciones educativas (Universidad Autónoma Chapingo), entre otros, no se

tiene antecedente de que se hayan realizado estudios sobre vulnerabilidad acuífera en la región de Texcoco.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo de este estudio

El objetivo de este trabajo de investigación consiste en evaluar el nivel de vulnerabilidad del acuífero de Texcoco, en zonas aledañas a los sitios detectados como susceptibles de incorporar materiales naturales y/o antropogénicos, que impacten la calidad del agua.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar el marco geológico e hidrogeológico de la zona de estudio.
- Definir la profundidad, elevación y evolución del nivel estático.
- Estimar la conductividad hidráulica saturada de campo (permeámetro Guelph e infiltrómetro de doble cilindro), en las zonas susceptibles a la infiltración de contaminantes.
- Elaborar mapas temáticos de vulnerabilidad acuífera usando métodos como; AVI y parámetros de Dar Zarrouk.

1.5. Hipótesis

Al establecer el nivel de vulnerabilidad e identificar las fuentes potenciales de contaminación, se genera un mapa de riesgo con el cual se pueden identificar las zonas susceptibles de incorporar contaminantes al acuífero, aportando así una herramienta para la planificación de actividades socio-económicas y el ordenamiento territorial, para posteriormente desarrollar políticas de gestión y protección para prevenir la contaminación del agua subterránea y el aprovechamiento adecuado del acuífero.

Si al conjuntar los resultados de las actividades para determinar el nivel de vulnerabilidad, resulta que el sitio en estudio es altamente susceptible de infiltrar o incorporar contaminantes al acuífero, es decir, que el área de estudio es altamente vulnerable, se propondrán medidas de mitigación que controlen o eviten que los contaminantes potenciales alcancen el agua subterránea.

1.6. Estructura de la tesis

Los capítulos se estructuran de la siguiente manera; en el primer capítulo, se aborda la importancia del agua subterránea y la problemática de contaminación del acuífero en estudio, así como la justificación, hipótesis y objetivos que dieron pie al trabajo de esta tesis que evalúa el riesgo de contaminación por el método AVI, y los parámetros de Dar Zarrouk, aplicados al acuífero de Texcoco. El capítulo 2, incluye un análisis del estado de conocimiento respecto al problema en estudio. Se abarcan los conceptos básicos de la problemática del agua subterránea en el acuífero de Texcoco y sus características geológicas e hidráulicas, además se describen algunos de los métodos para la evaluación de los niveles de vulnerabilidad utilizados en los diferentes países, haciendo énfasis en sus ventajas y desventajas, así como, la adaptación de estos a las características del acuífero en estudio. En el capítulo 3, se presenta el artículo Zonificación de la capacidad protectora y vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de Texcoco, Estado de México, aplicando los parámetros de Dar Zarrouk, y el método AVI. En el capítulo 4, se describe el procedimiento para la determinación de la conductividad hidráulica saturada (K_{fs}), por métodos *“in situ”*, con un punto de vista macroscópico y se abordan técnicas para evaluar la infiltración básica, en la zona del acuífero. En el capítulo 5, se presenta un artículo, el cual sirvió como guía para desarrollar los métodos geoelectricos de trabajo con Tomografía Eléctrica Resistiva (TER) que complemento los trabajos de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV). El producto de este último artículo fue presentado en el congreso de Academia Journals 2017 en Celaya, Guanajuato, México, en noviembre 8, 9, y 10, del 2017. Publicado en “Memorias del Congreso

Internacional de Investigación Academia Journals Celaya 2017, Volumen 09, No. 6, páginas; 6897 a 6901. ISSN 1946-5351 online. Disponible en <https://www.academiajournals.com/publicaciones-celaya>. Por último, en el capítulo 6, se presentan las conclusiones generales de este trabajo de investigación.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

El creciente aumento de la población y su desarrollo industrial requiere cada vez mayor demanda en servicios de agua para lograr abastecer las necesidades de la región. El Valle donde se localiza el acuífero de Texcoco, se ha visto afectado por la cercanía que tiene con la Ciudad de México, generando un polo de crecimiento en la zona y por consecuencia la demanda de un mayor volumen de agua. Aunado a esto la generación de residuos, producto de la industrialización y la creciente mancha urbana, genera problemas en; la disposición de los mismo, tratamiento adecuado de las aguas residuales, y la sobreexplotación del acuífero, deteriorando la calidad del agua subterránea.

En las últimas décadas, ha surgido a nivel internacional, un gran interés por conocer el comportamiento de los acuíferos a la contaminación, así como el grado de protección intrínseca que presentan, esto se ve reflejado en países, que se han preocupado por generar mapas para valorar el riesgo de contaminación de sus acuíferos como Costa Rica (SENARA, 2018), que cuenta con información y una guía metodología para evaluar la vulnerabilidad acuífera, como una herramientas de planificación para la protección de los recursos hídricos subterráneos. Otros países desarrollados y en vías de desarrollo también han aplicado diferentes metodologías para evaluar la vulnerabilidad de sus acuíferos. México no ha sido la excepción, se han realizados estudios de vulnerabilidad acuífera de tipo específica e intrínseca, realizados de manera local, con apoyo de diversas instituciones educativa del país o por gobiernos estatales, promovidos por el interés de protección al agua subterránea de su región. Algunos estudios de vulnerabilidad acuífera, realizados en México abarcan estados como Guanajuato (Ramos y Rodríguez, 2003; Tovar y

Rodríguez, 2004; Mählknecht et al., 2006;), Yucatán (Pérez y Pacheco, 2004; Aguilar et al., 2013; Torres et al., 2014; González et al., 2018), Morelia (Silva et al., 2010; Estrada et al., 2013); Ciudad de México (Hernández-Espriú et al., 2014), Estado de México (Velázquez et al., 2017; Garfías et al., 2017), entre otros, en donde se han aplicado diferentes métodos de estimación para determinar la vulnerabilidad acuífera de la zona que abarca cada uno.

En este trabajo se abordan dos métodos importantes de tipo intrínseco, para determinar la vulnerabilidad acuífera; el método AVI y los parámetros de Dar Zarrouk, en los cuales se aplica la estrategia de generación de mapas, para conocer el grado de riesgo y vulnerabilidad intrínseca natural, que presenta el acuífero en estudio.

2.1. Métodos para evaluar vulnerabilidad acuífera

La expresión “vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación” fue introducida por el hidrogeólogo francés Jacques Margat en los años 60’s, fue pionero en utilizar este concepto metodológico y realizar el primer mapa cartográfico a escala para representar la vulnerabilidad acuífera, con el concepto de que el entorno físico confiere un grado de protección a contaminantes que pueden percolar desde la superficie. A principios de los setenta Albinet y Margat (1970), enfatizaban la importancia de utilizar metodologías que describen la existencia o ausencia de factores naturales que protegen las capas freáticas contra el riesgo de contaminación accidental, con base a la elaboración de mapas que indiquen los diferentes grados de riesgo, al definir las áreas sensibles a la contaminación. Mientras que Foster e Hirata (1991), introducen el concepto de riesgo de contaminación del acuífero como la probabilidad de que el agua subterránea se contamine con alguna sustancia en concentraciones mayores a los estándares normados por la Organización Mundial de la Salud para agua de consumo humano. En el cuadro 1. se mencionan algunas de las definiciones de Vulnerabilidad acuífera.

Cuadro 1. Definiciones del término vulnerabilidad de acuíferos (intrínseca y específica). Fuente (Vargas 2010, Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo Territorial. Colombia).

Autor	Definición
Margat, (1968)	Capacidad protectora que tiene el material geológico para contrarrestar efectos adversos de contaminantes, que pueden afectar el agua subterránea, cuando son depositados en la superficie del suelo.
Olmer y Rezác, (1974)	Nivel de peligrosidad determinado por las condiciones inherentes del entorno natural e independientemente de la fuente de contaminación.
Albinet y Margat, (1975)	Probabilidad de percolación del contaminante al acuífero por infiltración y difusión, según el tipo de afloramiento geológico y condiciones hidrogeológicas.
Villusem et al., (1983)	Grado de riesgo de que algún contaminante presente en la capa superficial del suelo que pueda deteriorar la calidad del agua subterránea.
Foster, (1987)	Peligro de impactar negativamente la calidad del agua subterránea, por presencia de sustancias contaminantes en el medio ambiente (entorno).
Sotornikova y Vrba, (1987)	Capacidad o habilidad del medio hidrogeológico para minimizar o atenuar impactos extremos (antropogénicos o naturales), que afecten al acuífero en el tiempo y espacio.
Civita, (1988)	Probabilidad de riesgo a infiltración de contaminantes en fase líquida o soluciones acuosas que migren a través de la zona no saturada.
Foster e Hirata, (1991)	Sensibilidad o grado de afectación que presenta un acuífero, para ser impactado, de manera negativa, por una carga contaminante impuesta.
EPA, (1991)	Considera la capacidad que tiene el medio ambiente de impedir que un contaminante logre alcanzar la zona saturada, considera las prácticas agrícolas y propiedades de sustancias utilizadas en la agricultura
Carbonell, (1993)	Se enfoca en la capacidad y propiedades de los contaminantes para alcanzar la zona saturada, al ser depositados encima del acuífero más somero.
Vra et al., (1994)	Es una función de factores hidrogeológicos y materiales geológicos. Considera que existe peligro de contaminación del agua subterránea debido a un contaminante o familia de contaminantes de características y comportamientos similares.
Daly y Warren, (1994)	Características geológicas e hidrológicas que establecen la sensibilidad del agua subterránea a la contaminación por actividades antrópicas.
Custodio, (1995)	Se enfoca en la poca capacidad que tiene el sistema acuífero para contrarrestar las alteraciones, tanto naturales como artificiales.
Daly et al., (1997, 2002)	Considera el entorno del acuífero (geología, hidrogeológica, clima, presencia de actividad biológica). Evalúa la susceptibilidad del agua subterránea a la contaminación por actividades del ser humano, independientemente del tipo de contaminante y del tipo de acuífero. Considera la afectación o influencia del contaminante o grupo de contaminantes concretos.
Zwahlen, (2003)	Visualiza las características naturales del sistema (clima, uso de suelo, relieve, hidrogeología) para evaluar la susceptibilidad a contaminantes antropogénicos. Esta definición se limita a las características específicas e intrínsecas de un área.

Desde entonces, numerosas definiciones, valoraciones, metodologías e interpretaciones se han desarrollado, a través de los años, logrando establecer la importancia de elaborar mapas de vulnerabilidad que permitan establecer, implementar y desarrollar estrategias de protección de las aguas subterráneas.

La vulnerabilidad y riesgo a la contaminación propios de un acuífero son función principal de los factores y variables de su entorno natural y son opuestos a la resistencia que presenta (capacidad natural de protección *in situ*). Los procesos que influyen directamente en la probabilidad de contaminación de un acuífero están relacionados con la factibilidad de fenómenos de transporte y de interacción química en los estratos subyacentes al mismo. Algunos de estos procesos son: capacidad de sorción y permeabilidad de los materiales geológicos; volatilización, dilución, reacciones de óxido-reducción, hidrólisis, neutralización, y biodegradación de contaminantes infiltrados. Una variable muy importante es el tiempo de residencia de los posibles contaminantes en cada estrato ya que a mayor tiempo de residencia es probable una mayor atenuación del eventual efecto en el acuífero.

El término de “vulnerabilidad del agua subterránea” se ha ampliado significativamente, para abarcar aspectos relacionados con amenazas por contaminación natural, estimuladas por el cambio climático (intrusión de agua de mar), así como nuevas amenazas de tipo antropogénica, problemas con los llamados contaminantes emergentes (Vías, 2005). Los mapas de vulnerabilidad y riesgo son herramientas que permiten identificar, zonas en las cuales existe mayor o menor atenuación natural a la contaminación, además permiten encontrar un equilibrio, con base científica, a la protección de las aguas subterráneas sin mermar el desarrollo de las actividades económicas de la población. Los mapas de vulnerabilidad acuífera proveen la información necesaria para distinguir las propiedades naturales del medio geológico y propiciar la protección del agua subterránea contra diversos contaminantes que

pueden infiltrarse; derivados de fenómenos naturales o asociados con la actividad de poblaciones cercanas (Valcarce, 2016).

Los estudios de riesgo y vulnerabilidad acuífera además de tomar en cuenta las características naturales del acuífero y la zona no saturada, también consideran los diferentes contaminantes (agrupándolos por tipos), debido a que cada sustancia se comporta de diferente manera, siendo esto consecuencia de las características fisicoquímicas del contaminante y la interacción con las propiedades intrínsecas del acuífero. Depende principalmente de tres variables que están en función con la sustancia contaminante; el tiempo de transporte, la estabilidad química y la concentración máxima de la sustancia (Vlaicu y Munteanu, 2008).

En general, existen tres técnicas empleadas en la creación de mapas de evaluación de vulnerabilidad; técnicas estadísticas, técnicas en simulación basadas en procesos y técnicas basadas en índices.

Los modelos de mapa realizados con técnicas estadísticas relacionan la variabilidad de los parámetros espaciales y la presencia de algún contaminante específico en el agua subterránea, no son de naturaleza genérica, abarcan la variabilidad de un contaminante en específico.

Las técnicas basadas en procesos emplean modelos de simulación para pronosticar el movimiento del contaminante, sin embargo requieren un gran número de datos, para lograr una predicción adecuada. Su objetivo es tratar de predecir el transporte de los contaminantes antropogénicos en espacio y tiempo. Son modelos complejos que requieren información específica; del contaminante (solubilidad, coeficiente de distribución, reacciones y vida media, entre otros); parámetros edáficos, (coeficiente de dispersión, propiedades hidráulicas, pH, textura, densidad aparente); parámetros del cultivo (distribución y profundidad máxima de raíces); parámetros climáticos (temperatura diaria máxima y mínima,

horas de sol), entre otros (Aguilar et al., 2013). Requiriendo para la modelación un gran número de datos, que complican el proceso de mapeo.

Las técnicas basadas en índices no se ven obstaculizadas por las complejidades computacionales y la escasez de datos, por tal razón son las técnicas ampliamente aplicables para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas. Estas últimas técnicas, tienen la ventaja sobre las otras, de que no son complicadas. No se requiere el desarrollo de procesos matemáticos o computacionales extensos ni complejos, tampoco por la escasez de datos, por eso son preferidas para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas (Prashant et al., 2020).

2.2. Mapas de vulnerabilidad con base en índices

Para conocer la vulnerabilidad de los acuíferos, las técnicas basadas en índices son las utilizadas comúnmente, porque presentan sensibilidad a gran escala y una sencilla implementación. A su vez, se dividen en tres categorías; modelos paramétricos, no paramétricos e híbridos (Figura 1). Los modelos paramétricos, están representados por un número finito de parámetros. Cada parámetro tiene su propio significado y rango particular dividido en varios intervalos. A estos intervalos se les asigna un valor en particular. Los modelos pragmáticos, considera tres factores importantes en la estimación de las zonas vulnerables a la contaminación; uso y condiciones del suelo, características de la zona no saturada, y el transporte en la zona saturada, que conducen a un valor de índice de vulnerabilidad final que significa el grado de contaminación.

De los modelos pragmáticos el más utilizado es el modelo DRASTIC. Fue desarrollado principalmente por Aller (1987), en la Asociación Nacional de pozos de agua de Dublín, Ohio y en colaboración con la Agencia de Protección Ambiental de los Estado Unidos de América (EPA), con la finalidad de determinar el potencial de contaminación del agua subterránea usando parámetros

hidrogeológicos. El modelo asume cuatro aseveraciones 1) el contaminante se libera en la capa superficial del suelo, 2) el contaminante se solubiliza a través del agua de lluvia, infiltrándose hasta el agua subterránea, 3) el contaminante se mueve a la velocidad con la que fluye el agua. El área por evaluar debe ser suficientemente grande (Prashant et al., 2015).

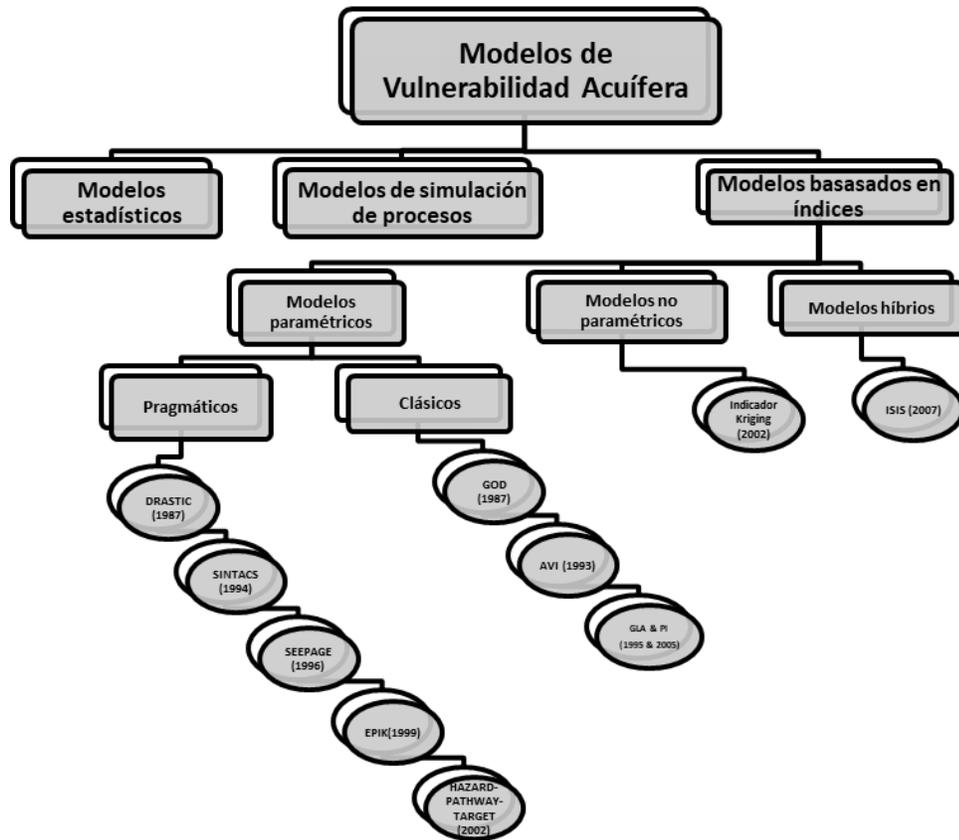


Figura 1. Modelos basados en índices para evaluación de vulnerabilidad acuifera. Según Prashant et al., 2020.

El método AVI, es un modelo paramétrico clásico que fue desarrollado por Van Stempvoort et al. (1992) en Canadá. Su fundamento está basado en dos parámetros importantes; espesor promedio de cada estrato identificado de los depósitos sedimentarios localizados encima del nivel freático o piezométrico, y su respectiva conductividad hidráulica. Este modelo considera todos los

parámetros del modelo DRASTIC a excepción de la topografía e ignorando el transporte de contaminantes en el medio acuífero. El modelo AVI, permite calcular un factor denominado resistencia hidráulica (R_H) y está en función de cada depósito o estrato sobre el acuífero. La resistencia hidráulica, determina el tiempo de tránsito del agua para que infiltre (verticalmente) a través del medio poroso, a partir de la superficie, considerando el fenómeno de advección. Con ayuda del método AVI se mapea la zona y se evalúa su severidad en función al tiempo de transito del agua, que infiltre, hasta llegar a la zona saturada del acuífero (Angulo-Jaramillo et al., 2016).

Otro método para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero es con los parámetros de Dar Zarrow. Este método tiene como fundamento determinar la conductancia longitudinal (S) y la resistencia transversal (R_T) de los estratos suprayacentes al acuífero. Con ayuda de dos parámetros fundamentales: su resistividad eléctrica y espesor se obtiene S y R_T . El término “Dar Zarrow”, se utilizó por primera vez en literatura de prospección eléctrica por el físico francés Maillet (1947), para describir la relación entre la conductancia longitudinal (S) y resistencia transversal unitaria (R_T). Estos parámetros pueden ser determinados con ayuda de técnicas geofísicas de resistividad eléctrica, al combinar directa o indirectamente la resistividad de la capa geoelectrica y el espesor. Para representar los parámetros de Dar Zarrow (S) y (R_T), Orellana (1982) propuso un prisma rectangular (Figura 2). Al fluir la corriente eléctrica en el subsuelo, puede tomar dos caminos; uno perpendicular y otro paralelo a la estratificación.

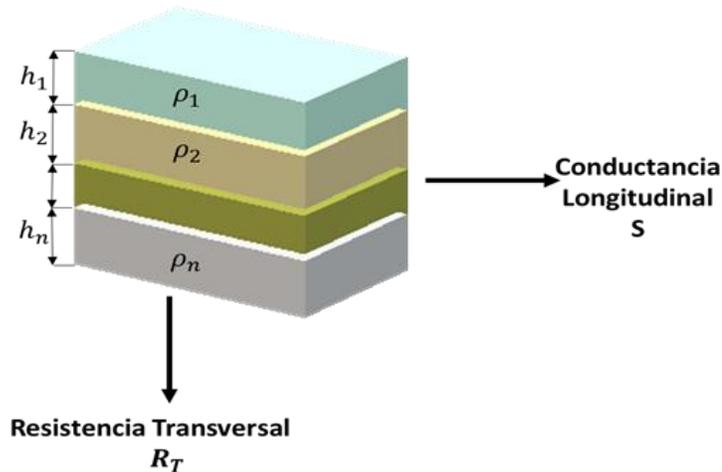


Figura 2. Representación de parámetros de Dar Zarrouk.

Cuando la intensidad de corriente pasa de manera perpendicular a la estratificación se representa como resistencia transversal (R_T).

La resistencia transversal unitaria ($\text{ohm}\cdot\text{m}^2$), se determina con la ecuación 1;

$$R_T = \sum_{i=1}^n h_i \rho_i \quad . \quad (1)$$

Donde, h_i (m) es el espesor de la capa "i" y ρ_i ($\text{Ohm}\cdot\text{m}$) es la resistividad de la capa "i", mientras que (n) es el número de capas desde la superficie a la profundidad de investigación.

Cuando la intensidad de corriente atraviesa de manera paralela a la estratificación, se define como conductancia longitudinal (S).

En donde los valores de este parámetro, Conductancia Longitudinal Unitaria (S, mhos), representa las unidades de roca de cobertura en el área de estudio (ecuación 2), en cada estación de SEV realizado.

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} \quad (2)$$

Donde h_i (m) es el espesor de la capa “i” y ρ_i (Ohm·m) es la resistividad de la capa “i”, mientras que (n) es el número de capas desde la superficie a la profundidad de investigación.

Para una protección adecuada del agua subterránea es necesario tener conocimiento de las características de las capas superficiales del acuífero, debido a la naturaleza heterogénea del subsuelo las propiedades varían ampliamente de una zona a otra. Conocer el grado de protección que confiere el suelo al acuífero es relevante para proteger zonas que permiten la infiltración de contaminantes, producto de actividades antropogénicas (lixiviados, pesticidas, fosas sépticas, derrames, entre otros).

El conocimiento de la geología e hidrología de la zona de interés permite establecer las bases para conocer la naturaleza y distribución del acuífero, logrando focalizar áreas de recarga o que permitan la infiltración de algún contaminante a la zona saturada del acuífero, así como establecer medidas para un aprovechamiento racional del agua subterránea.

2.3. Acuífero de Texcoco

2.3.1. Localización

El acuífero de Texcoco abarca una superficie de 933.6 Km²; pertenece a la subregión del Valle de México que administra la Región Hidrológica Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. El Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de CONAGUA le asignó la clave 1507 (DOF, 2019).

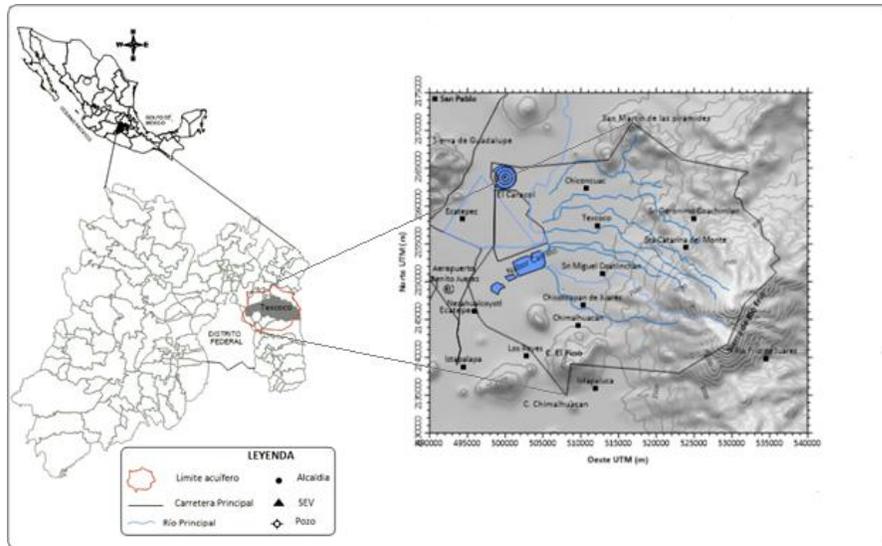


Figura 3. Localización de área del acuífero de Texcoco.

El acuífero de Texcoco se sitúa al oriente del Valle de México; entre los paralelos 19°18' y 19°38' latitud norte y meridianos 98°39' y 99°03' longitud oeste (Figura 3). Colinda con el acuífero Cuautitlán-Pachuca, al norte; mientras que al sur y sureste con el acuífero Chalco-Amecameca, ambos pertenecen al Estado de México (Figura 4); al este limita con el acuífero Soltepec, del estado de Tlaxcala; y al oeste con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (CONAGUA, 2015). El acuífero de Texcoco se comunica al norte y oriente a través de materiales aluviales y lacustres con el acuífero de la zona Metropolitana de la Ciudad de México y el acuífero Cuautitlán- Pachuca (Escolero et al., 2009).

El territorio donde se asienta el acuífero de Texcoco comprende catorce municipios, del estado de México; abarcando por completo a Chicoloapan, Chimalhuacán, Chiconcuac, Papalotla y Texcoco y casi por completo a los municipios de; Atenco, La Paz, Chiautla, Tepetlaoxtoc, Ixtapaluca y Nezahualcóyotl, así como pequeñas zonas de los municipios de Ecatepec de Morelos, Acolman y Tezoyuca (DOF, 2019).

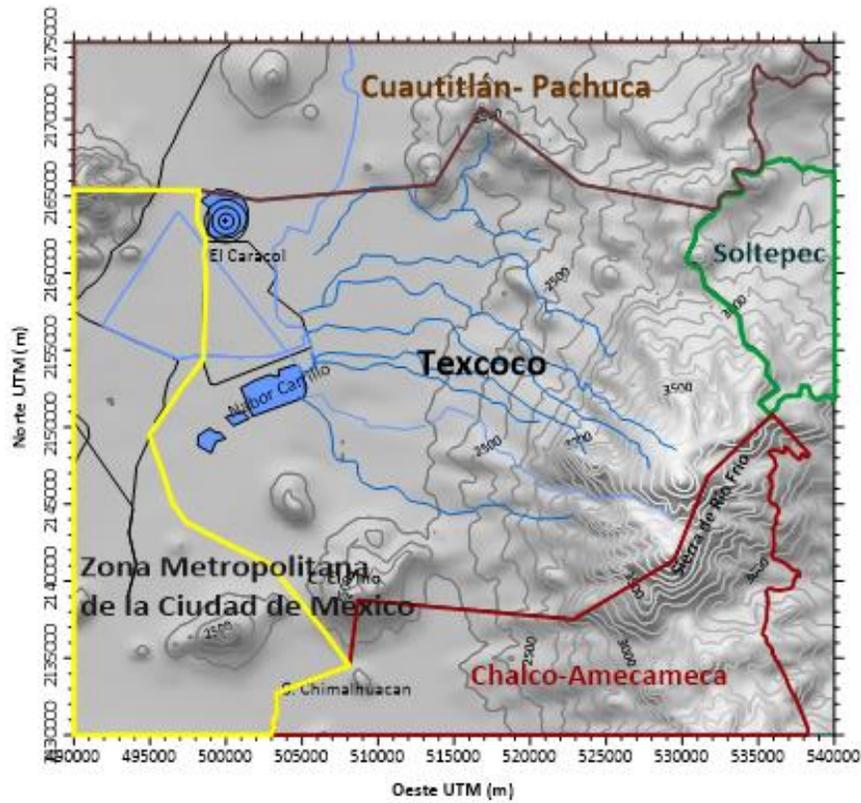


Figura 4. Acuíferos colindantes al acuífero Texcoco.

En el 2015, se contabilizaron 3,105,559 habitantes en localidades dentro de los límites del acuífero de Texcoco, de acuerdo con datos del censo del Instituto Nacional de estadística y Geografía (INEGI), realizados cada cinco años (Cuadro 2), se excluyeron los municipios que solo pequeñas porción de su área se localiza dentro del acuífero.

Las poblaciones con mayor número de habitantes fueron; Ciudad Nezahualcóyotl, Chimalhuacán, Chicoloapan de Juárez, Texcoco de Mora, San Francisco Acuautla, La Magdalena Atlicpac y San Miguel Coatlinchán (DOF, 2019).

Cuadro 2. Población de los municipios dentro de los límites del acuífero de Texcoco (INEGI, 2015).

Municipio	Población total
Atenco	62,392
Chiautla	29,159
Chicoloapan	204,107
Chiconcuac	25,543
Chimalhuacán	679,811
Ixtapaluca	495,563
La Paz	293,725
Nezahualcóyotl	1,039,867
Papalotla	3,963
Tepetlaoxtoc	30,680
Texcoco	240,749

El incremento de la población y el desarrollo industrial, en la zona del acuífero de Texcoco, ha generado un consumo excesivo de agua y como consecuencia el aumento en los volúmenes de extracción, ocasionado el desequilibrio del sistema hidrológico.

El principal uso del agua subterránea del acuífero de Texcoco es el público urbano (70%). La Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA), se determinó en -111.866 hm^3 , lo que indica que el volumen total de agua que se extrae es superior al volumen de recarga, por lo que existe un déficit en el acuífero. Este acuífero forma parte de los 115 acuíferos sobreexplotados del territorio mexicano. El acuífero de Texcoco se encuentra vedado casi en su totalidad por una veda tipo I, en la cual debido a la capacidad del manto solo se permite extracciones limitadas para usos domésticos, y en una pequeña porción del extremo suroriente por veda tipo II, que permite extracciones para usos domésticos y de abrevadero (DOF, 2019; CONAGUA, 2018b).

2.3.2. Clima

El clima en la Superficie que comprende al acuífero de Texcoco es seco templado o árido templado, con verano cálido, régimen de lluvias en verano, mientras que en invierno el porcentaje de lluvia es menor al 5% anual.

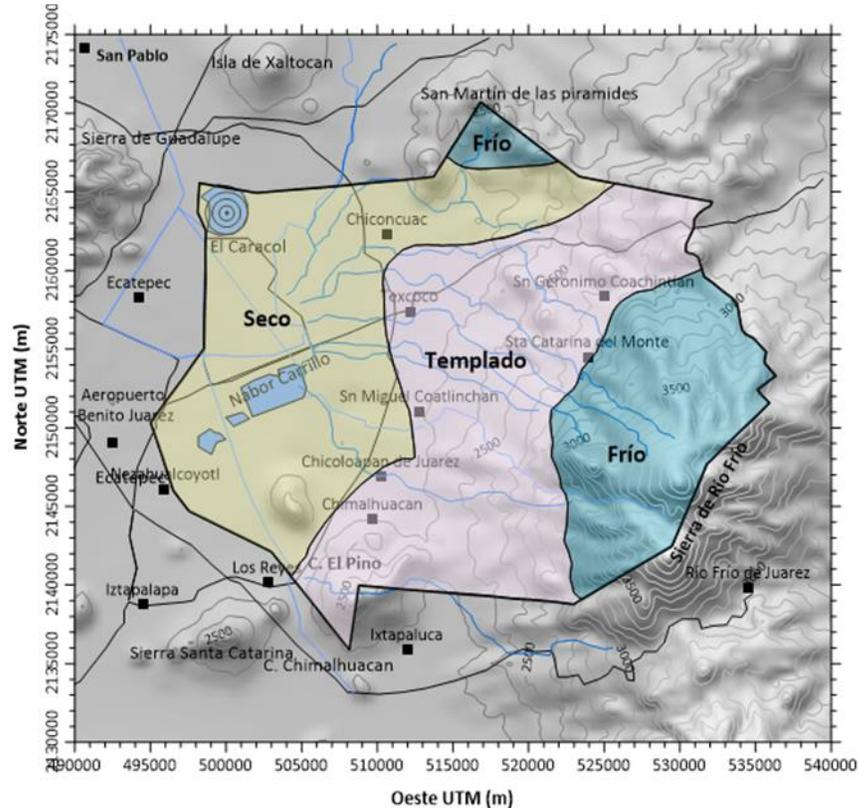


Figura 5. Clima en la superficie del acuífero de Texcoco. (Fuente: CENAPRED, 2019).

En las sierras de mayor altitud se presenta el clima semifrío subhúmedo. En la parte más alta del Monte Tláloc el clima es muy frío (-2 y 5°C), sobre todo en temporada de invierno (Figura 5). La precipitación media anual, en la zona del acuífero es de 750 mm y temperatura media anual, que varía en el rango de entre 10° a 25 °C, dependiendo de la altitud de la zona. Para la determinación de estas variables climáticas, CONAGUA (2018b), recopiló información de 15 estaciones

climatológicas dentro del área del acuífero de Texcoco y 6 más en sus inmediaciones (DOF, 2019).

Fisiografía y Geomorfología

El acuífero de Texcoco se localiza en la porción central de la Subprovincia Fisiográfica Lagos y Volcanes la cual pertenece a la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico donde se formó la cuenca endorreica del Valle de México, hace más 600,000 años, producto de emisiones volcánicas que formaron una enorme serranía natural; la Sierra de Chichinautzin, ubicada al sur de la cuenca de México constituida por un extenso campo de volcanes mono genéticos (Mooser, 1975; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

Los lagos Texcoco, Zumpango y Tláhuac se originaron al cerrarse la salida natural de la cuenca del Valle de México. Las zonas montañosas que circundan al Valle son de origen volcánico, entre las de mayor importancia están; La Sierra Nevada al este, la Sierra de las Cruces al oeste y la Sierra de Chichinautzin al Sur. Dos elementos geomorfológicos caracterizan el territorio donde se ubica el acuífero de Texcoco; las zonas altas que rodean al Valle, constituidas por sierras, cerros, laderas y lomeríos, y una zona con menor altitud, que forma una altiplanicie con materiales lacustres, en proceso de desecación y pequeñas elevaciones topográficas aisladas (CONAGUA, 2018b).

2.3.3. Geología General del acuífero

Los materiales geológicos del acuífero de Texcoco están relacionados con la formación de la cuenca del Valle de México a la cual pertenece, por lo que predominan las rocas volcánicas extrusivas que datan del Eoceno en su basamento hasta el cuaternario en su superficie. Su formación se debe a procesos volcánicos y tectónicos ocurridos tras haber emergido del océano, gran parte de lo que ahora es México (López-Blanco y Tapia-Varela, 2001).

Las rocas más antiguas que se detectaron en el subsuelo de la Cuenca son de tipo anhidritas, sobre este material se identifican calizas, lutitas y areniscas del Cretácico Superior, con material intercalado de; lavas, tobas y cenizas, producto de los procesos volcánicos, tectónicos y sedimentos continentales transportados por ríos y arroyos de las partes altas y que rellenan los valles (Cserna et al., 1988).

Los procesos estructurales (esfuerzos tensionales y consecuentemente fracturamiento en bloques), dio origen a fosas tectónicas, en donde se depositaron los primeros sedimentos representados por la Formación Balsas, constituidos por rocas clásticas gruesas derivadas de la erosión de las antiguas sierras cretácicas. La composición petrográfica de las rocas es variada, existe presencia de derrames y productos piroclásticos de composición andesítica y numerosas unidades dacíticas y riódacíticas, conformando las partes altas de las sierras, mientras que en las zonas bajas afloran tobas arcillosas, lentes de aluvión y depósitos lacustres (Reyes, 2016).

El origen de los depósitos lacustres del Pleistoceno-Holoceno, está relacionado con la formación de la Cuenca de México, en diversas zonas de la planicie se presentan costras de material de granulometría fina cementados con CaCO_3 (caliche) (López-Blanco y Tapia-Varela, 2001).

En el mioceno y gran parte del Plioceno, los procesos de vulcanismo dieron origen a la Sierra de las Cruces, de Río Frío y la Sierra Nevada, posteriormente en el Plioceno tardío, se desarrollaron los conos y domos del Iztaccíhuatl, constituidos por materiales de tipo andesítico, así como el cono activo del Popocatepetl. El vulcanismo principalmente de composición basáltica es reconocido en los cerros Chimalhuacán, Gordo y El Pino (Figura 6). La Sierra Nevada alcanzó su máximo desarrollo formando amplios abanicos volcánicos mientras que sierras de menor elevación, como la Sierra de Guadalupe desarrollo en sus laderas, abanicos aluviales menores. Al oriente y nororiente de Texcoco

con dirección a Tizayuca se localiza una superficie de gran extensión constituida por rocas volcánicas (CONAGUA, 2018b).

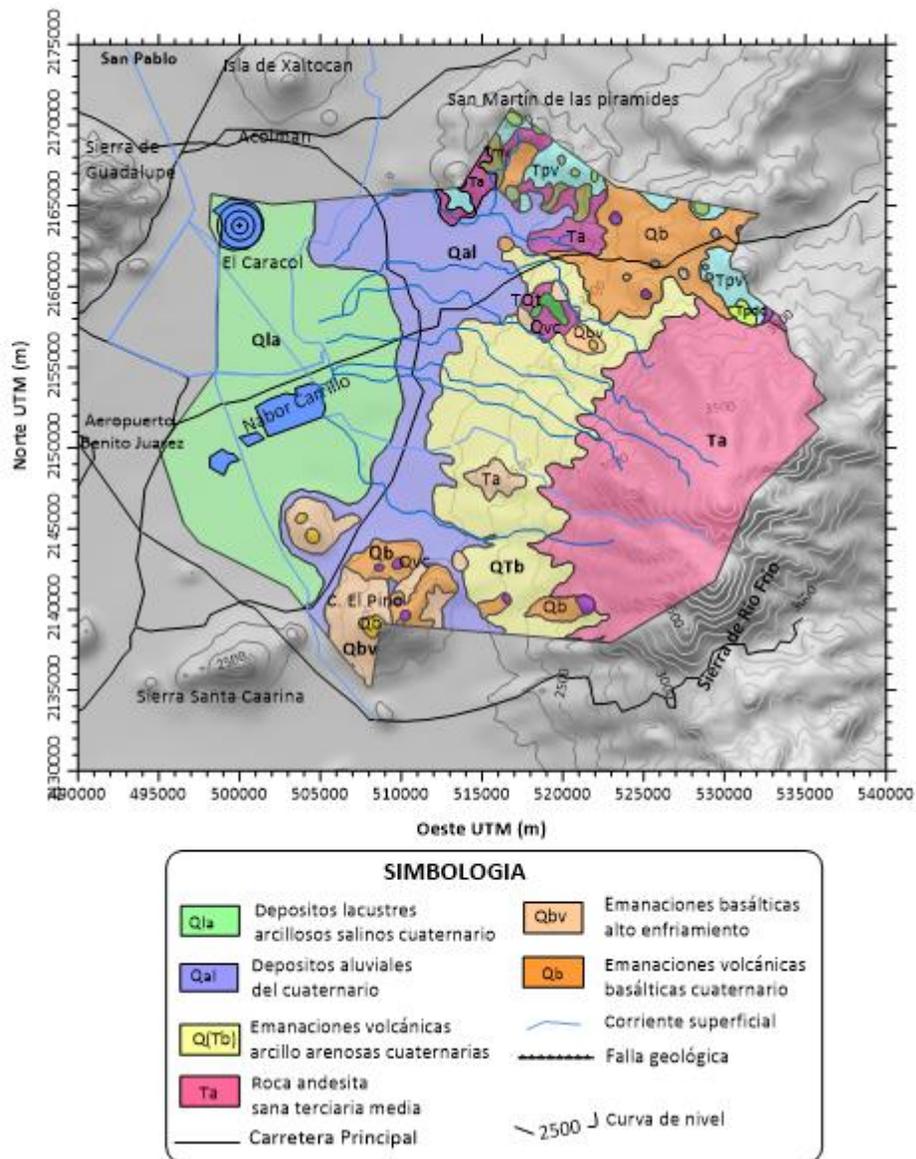


Figura 6. Geología General del acuífero de Texcoco (Modificado de INEGI, 2017; Escobar-Villagrán, 2012).

Durante el Plioceno Tardío y Cuaternario, se originaron amplias fosas tectónicas que fueron rellenas por materiales clásticos erosionados; gravas, arenas, cenizas

y arcillas, estas últimas, relacionadas con la actividad del estratovolcán Popocatepetl y la sierra de Chichinautzin, depositándose en un ambiente lacustre, que formaron una gran altiplanicie desde Texcoco hasta el cerro de Chapultepec, además de rocas provenientes de la actividad volcánica contemporánea (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

Geología estructural

Se han localizado fallas normales y activas de tipo distintivo en la zona del acuífero de Texcoco lo que indica que la región ha estado sometida a la acción de fuerzas de tensión, que iniciaron desde el Pleistoceno o Mioceno tardío. El volcán más importante, de la zona del acuífero, es el estratovolcán Tlaloc, cuyos productos evolutivos alcanzaron el lago de Texcoco, y que junto con el cerro Telapón, formados a finales del Mioceno, son parte de la Sierra de Río Frío, la cual limita al acuífero en la zona oriente (Figura 7). El estratovolcán Tlaloc tiene un diámetro de aproximadamente de 20 Km, sus laderas están formadas por material piroclástico, mientras que en la parte alta se compone de secuencias de lavas y piroclásticos (tobas y brecha volcánica), lo que constituye un gran volumen de material granular en la porción oriental del área (CONAGUA, 2015).

La estructura geológica más antigua de la región es la Sierra de Guadalupe ubicada al noroeste, con una longitud de aproximadamente 10 kilómetros y una elevación de 2,989 msnm, en la porción norte con elevaciones entre 2500 y 2700 msnm se encuentra la sierra Patlachique y el cerro de Chiconaultla, mientras que en la porción noreste se localizan algunos conos monogenéticos que forman parte del campo volcánico de la cuenca de México, al sur se localizan estructuras de volcán escudo; Chiconaultla, Chimahuacán y el Pino, así como la Sierra de Santa Catarina, (CONAGUA, 2015).

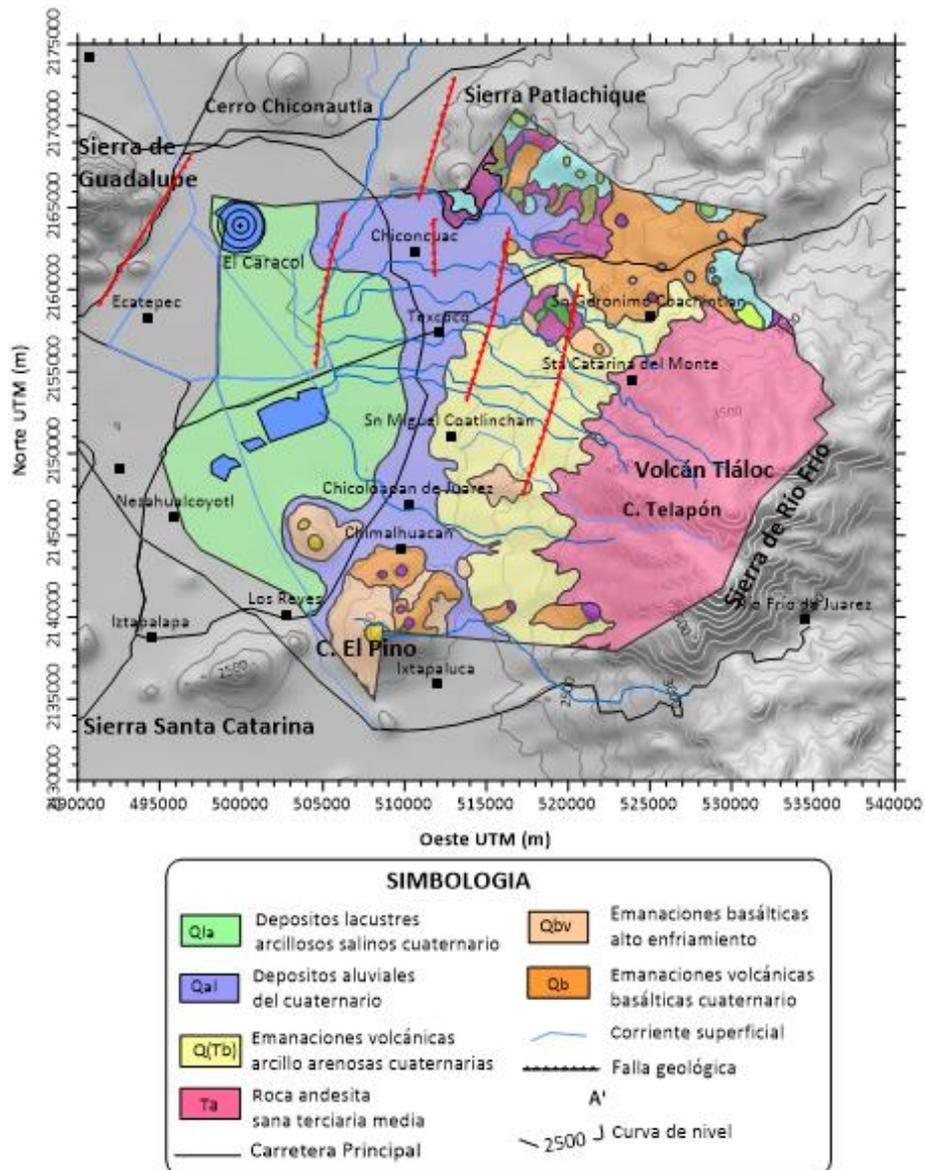


Figura 7. Geología estructural del acuífero de Texcoco, Estado de México.
(Modificado de INEGI, 2017; Escobar-Villagrán, 2012).

La Sierra Volcánica del Chichinautzin, conforma el límite inferior de la cuenca de México, aparentemente constituyo la última fase volcánica de la región, la cual culmino en la formación de la cuenca endorreica (Urrutia y Martín del Pozzo, 1993). Lineamientos asociados con fallas, se han detectado en dirección Este a Oeste, que atraviesan transversalmente al acuífero. La más importante atraviesa

la zona donde se ubican el antiguo lago de Texcoco, que inicia de la Sierra de Guadalupe y continúa por la zona noreste de Texcoco.

También existe un sistema de fallas normales profundas, que datan del Plioceno o Mioceno tardío, con direcciones; norte-noreste-sur y noreste-suroeste. Por lo que se considera que la zona lacustre del exlago de Texcoco está formada en una depresión tectónica afectada por fallas de al menos dos periodos distintos. El volumen y extensión de este paquete volcánico, demuestra la gran actividad volcánica que estuvo presente desde principios del terciario (CONAGUA, 2018b).

2.3.4. Litología e Hidrogeología

De acuerdo con estudios de determinación de la disponibilidad de agua, realizados por la Subdirección General Técnica y la Gerencia de aguas subterráneas (2003; 2005; 2018b), en el acuífero de Texcoco. El acuífero está constituido, por material de alta porosidad y baja permeabilidad, en su porción superior. Los cortes litológicos de los pozos Ramal Texcoco, demuestran que el material dominante es de tipo arcilloso, casi impermeable (rocas volcánicas antiguas y calizas), con una profundidad de 40 m, le subyace intercalaciones de tobas, areniscas, arcillas y gravas localizadas hasta una profundidad de 1400 m. Inferior a este material se localizó roca ígnea (2065 m).

La secuencia de materiales en el subsuelo ha dado origen a un sistema acuífero complejo; en la parte superior se identifica un estrato arcilloso heterogéneo, en su constitución, que forma un acuitardo. Bajo este acuitardo, se localiza el acuífero actualmente en explotación, sus propiedades y espesor son variables, está formado por material granular, producto de material piroclástico y conglomerado de origen volcánico, le subyacen, a este último estrato, rocas volcánicas fracturadas formando la zona inferior del acuífero, su espesor disminuyendo hacia los márgenes de la cuenca. Con ayuda de los cortes litológicos, sondeos geofísicos y evidencia geológica, se ha definido el acuífero

como un acuífero de libre a semiconfinado, heterogéneo y anisótropo (CONAGUA, 2018b).

Estudios realizados por la compañía Lesser y Asociados, S.A. de C.V (2005), determino que el acuífero de Texcoco es recargado en las zonas altas de las sierras del oriente y sur, principalmente por infiltración de lluvia. El agua infiltrada fluye hacia el poniente con dirección a la zona federal del ex lago de Texcoco, donde prácticamente no existe explotación por bombeo, del acuífero.

2.3.5. Comportamiento hidráulico del acuífero

Para conocer el comportamiento de los niveles del agua subterránea, se contó con información de CONAGUA, proporcionada por la Subdirección General Técnica y la Gerencia de aguas subterráneas del Valle de México, para un periodo que comprenden desde 1969 hasta 2017. Debido a que, en algunos pozos, no se localizó información ni se logró medir el nivel piezométrico (ya sea por obstrucción o porque no se permitió el acceso), se realizó una estimación de este, ajustando los valores históricos de mediciones de los niveles piezométricos existentes por regresión lineal y se determinó el factor de correlación de Pearson del comportamiento histórico del nivel de agua, de cada pozo. En el Anexo A, se presentan los datos de las mediciones del nivel piezométrico (CONAGUA, 2018) en campo y los estimados con su respectivo factor de correlación.

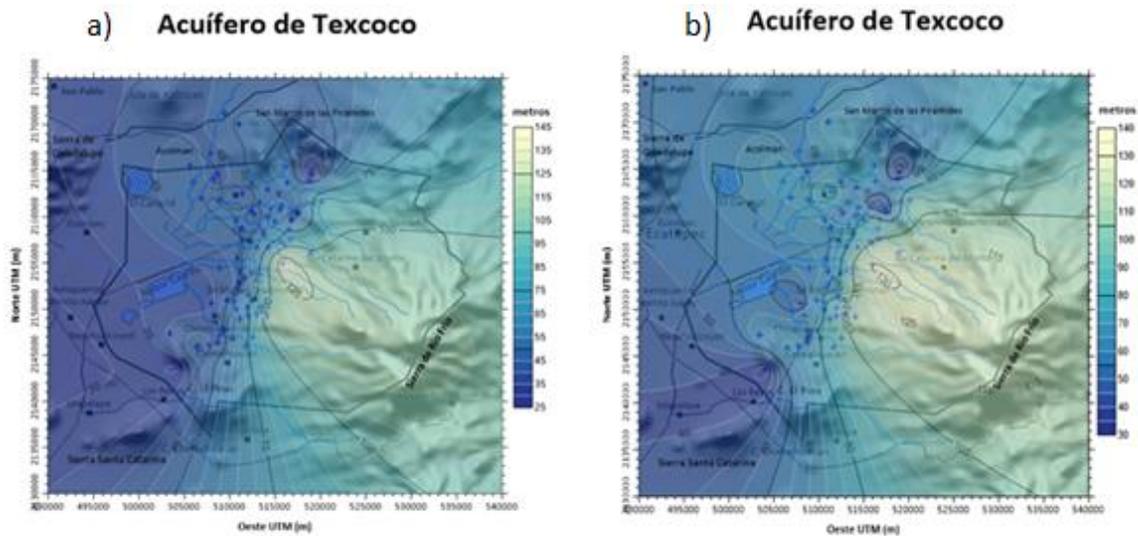


Figura 8. Profundidad del nivel de agua y ubicación de pozos de agua. a) Nivel estático, 2000, b) Nivel estático, 2019.

El comportamiento de la profundidad del nivel estático, para el 2000, presentó valores que oscilaron desde 25 m hasta 138 m (Figura 8a), mientras que para el 2019, la profundidad aumento de manera general, en un promedio de 5 m desde 32 m hasta 140 m (Figura 8b).

Los niveles del agua a menor profundidad se registran al occidente y suroccidental del área del acuífero y en las inmediaciones del lago Nabor Carrillo, de donde se incrementa por efecto de topografía, con dirección al Este. Los valores, donde el agua se localiza a mayor profundidad se ubicaron en la porción Este y Sureste, en las inmediaciones del volcán Tláloc, desde la comunidad San Miguel Tlaixpan hasta Santa Catarina del Monte (Figura 8). El flujo natural es de dirección de Este a Oeste, desde las zonas de mayor altitud, como la sierra Nevada y los lomeríos hacia la planicie lacustre (Escolero et al., 2009, CONAGUA 2018). Para identificar la afectación de los pozos de extracción de agua, ubicados

en la superficie del acuífero. Se modelaron los datos de dos periodos, separados por 19 años.

En ambos periodos, se corrobora que el flujo del acuífero es en dirección de Este a Oeste, siguiendo una tendencia de flujo natural de las zonas altas de la Sierra Fría hacia la planicie lacustre. Desafortunadamente el gran número de pozos de bombeo para la extracción del agua subterránea localizados en la zona centro del acuífero de Texcoco, ha formado importantes conos de abatimiento localizados en; el centro de Texcoco, así como en las inmediaciones de Chicoloapan de Juárez y Chimalhuacán (Figura 9 y 10), afectado el flujo natural del agua subterránea.

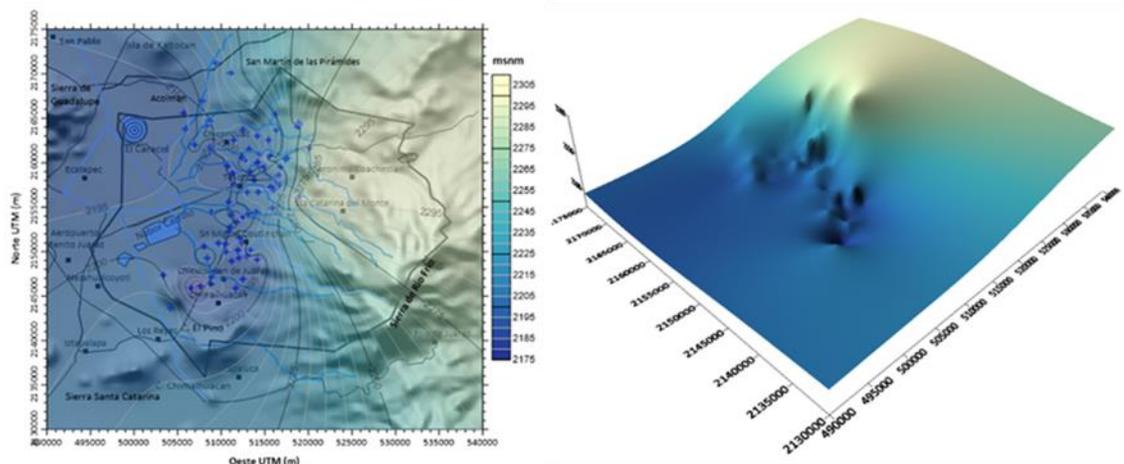


Figura 9. Elevación del nivel de agua (msnm), del año 2000 del acuífero de Texcoco, obtenidos de la base de CONAGUA, 2018.

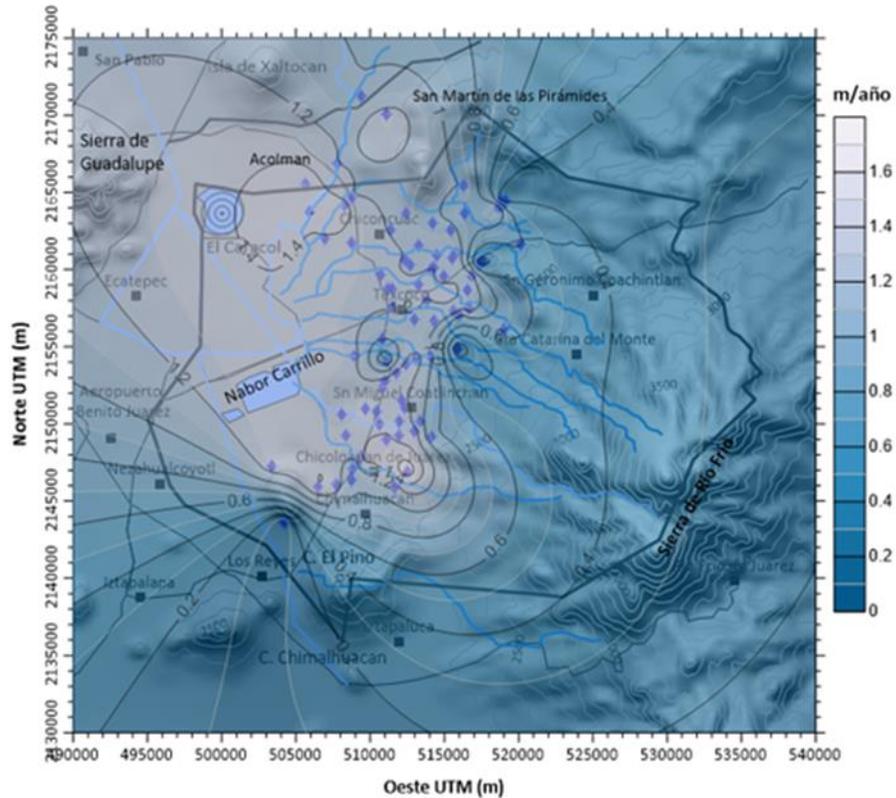


Figura 11. Evolución del nivel estático ($\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$), del periodo 1985-2019.

2.4. Estudios en la zona del acuífero de Texcoco

El área de Geohidrología, que pertenece a la carrera de Ingeniero en Irrigación, de la Universidad Autónoma Chapingo, ha realizado diversos estudios geofísicos de resistividad, con la finalidad de localizar zonas adecuadas para la reubicación de pozos de agua y/o detectar la zona saturada del acuífero. Por lo que cuenta con información de estudios Geoeléctricos, que sirvieron como base para la determinación de la vulnerabilidad del acuífero de Texcoco. Algunos de los trabajos realizados que sirvieron como base de datos para este trabajo, se describen en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Recopilación de algunos trabajos realizados en la zona del acuífero de Texcoco.

Trabajo	Autor	Síntesis
Archivos de piezometría y litología de pozos	CONAGUA 2018; 2019	Se recopiló información de CONAGUA, en la Subdirección general técnica y gerencia de agua subterráneas, en Av. José Loreto Favela No. 868. Gustavo A. Madero C.P. 07950, CDMX.
Base de datos, de sondeos eléctricos verticales, proporcionados por el área de hidrogeología de la Universidad autónoma Chapingo, (2018).	Reyes Ramírez Aurelio	Se realizó una recopilación de información, acerca de estudios Geoeléctricos realizados en el área de geohidrología del departamento de Irrigación, así como archivos de litologías de pozos de agua, de comunidades como; Coatlinchán, Chapingo, Huexotla, Montecillos, Texcoco, Zumpango, entre otros.
Estudio del subsuelo del Valle de Texcoco utilizando prospección geofísica eléctrica, (2011).	González Briceño Miguel Ángel	Realizan una descripción del subsuelo del Valle de Texcoco, con ayuda de geofísica eléctrica, apoyándose en la base de datos con la que cuenta el área de geohidrología, de la carrera de Irrigación.
Estudio de prospección geofísica en el municipio de Tezoyuca, Estado de México, (2008).	Alarcón García Juan Manuel	Se realizó un estudio geoelectrico resistivo, en la comunidad de Tezoyuca, utilizando un resistímetro Terrameter SAS 300B y una unidad reforzadora SAS 200, el objetivo de este estudio fue identificar alguna corriente de agua que pueda ser aprovechable para el abastecimiento de la región.
Metodología practica para evaluar las zonas de recarga natural a los acuíferos: caso valle de Texcoco, (2003).	Monrroy Alvarado Celia	Se propone una metodología para cuantificar la recarga natural a un sistema acuífero, por precipitación, identifica las áreas de recarga con apoyo de fotogrametría abarcan 234.87 Km ² , enfocándose en las zonas donde aflora la formación Tarango aluvión.
Geología de la porción oriental del valle de México, utilizando prospección geofísica eléctrica. Resultados de investigación, (1998).	Reyes Ramírez Aurelio	Se describe la posible estratigrafía de la zona poniente del acuífero de Texcoco y el plano geológico del Valle de Texcoco, ubicando una serie de fracturas naturales que cortan la zona del acuífero de norte a sur y de oeste a este, además de una descripción litología de los depósitos y estratigrafía de la zona.

Algunos estudios realizados en la zona lacustre del exlago de Texcoco son debido a su cercanía con la ciudad de México, como el estudio de vulnerabilidad acuífera de la ciudad de México, realizado por Ramos-Leal (2010), en el cual identifica, con el método SINTAC, que la zona lacustre del acuífero de la zona Metropolitana del Valle de México presenta un menor rango de vulnerabilidad acuífera, debido a los asentamientos humanos, mientras que la zona con baja calidad de agua se ubican en Tláhuac e Iztapalapa. Otro estudio relevante en la zona de la Ciudad de México es el reportado por Hernández-Espriú et al. (2014), en donde aplica DRASTIC-Sg metodología modificada de DRASTIC, que permite evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea en acuíferos urbanos que presentan hundimiento diferencial causado por el bombeo intensivo, donde menciona que regiones como Zumpango, Texcoco y Chalco presentan una tasa de hundimiento de $40 \text{ cm}\cdot\text{año}^{-1}$.

Con respecto al acuífero de Texcoco, no se localizó información de algún mapa de riesgo a la contaminación o de vulnerabilidad acuífera, por lo que este trabajo también tiene la finalidad de establecer las bases para la realización de estudios de riesgo y vulnerabilidad a la contaminación y lograr implementarlos en los planes de manejo de agua de la región, demostrando que es una técnica de fácil ejecución y que instituciones educativas de la región, como la Universidad Autónoma de Chapingo pueden aportar información importante para desarrollar propuestas y acciones que permitan mitigar problemas ambientales y de contaminación del agua y suelo.

En el caso del acuífero en estudio (Acuífero de Texcoco), para determinar los parámetros de Dar Zarrouk, se realizó la recopilación bibliográfica de estudios geoelectricos de sondeo eléctrico vertical, del área de Geohidrología, perteneciente a la carrera de Ingeniería en Irrigación en la Universidad Autónoma Chapingo y se completó la información con estudios de Tomografía eléctrica vertical y Nuevos Sondeos eléctricos verticales, realizados en el área de estudio. También se correlaciono la información de los sondeos eléctricos verticales y

tomografías eléctricas con información existente de litología de pozos, archivo proporcionados por CONAGUA. Subdirección General Técnica y gerencia del Valle de México, (ANEXO B).

2.5. Método geoelectrico de resistividad

Para estudiar las estructuras del subsuelo, existen diferentes metodologías entre las que se encuentran las exploraciones directas e indirectas.



Figura 12. Perfil estratigráfico en la zona de San Salvador Atenco, donde predominan materiales lacustres.

Una exploración directa, comúnmente utilizada, para conocer las características del subsuelo son los sondeos mecánicos los cuales proporciona información física que se encuentra a profundidad, como; espesor y profundidad de los

materiales y basamento, su litología, zonas con presencia de agua, fallas o fracturas, además se pueden obtener muestras para su análisis y clasificación.

Entre los métodos directos, las excavaciones de pozo a cielo abierto se realizan para observar y levantar el perfil estratigráfico de sus paredes, tienen un área aproximada de 1.00 X1.50 (como mínimo) y permiten determinar características físicas y químicas de los estratos del perfil (Figura 12). En este trabajo se realizaron cinco perfiles por este método de excavación, que corresponden a localidades de Tepetlaoxtoc, Texcoco, Tezoyuca, San Salvador Atenco y Coatlinchán.

Otro método directo para realizar la exploración del subsuelo, a mayor profundidad, es con equipo de máquinas de percusión y/o rotación, con esta metodología se debe tener especial cuidado de utilizar el equipo adecuado para el tipo de suelo (blandos o duros). El método directo de perforación, que se utiliza con mayor frecuencia, utiliza brocas de diamante, debido a que se pueden obtener núcleos de material, otra técnica de perforación, son los sondeos con pruebas de penetración estándar. Los métodos directos son técnicas confiables, desafortunadamente de muy alto costo. Se obtiene información puntual del sitio donde se ha realizado la perforación, por lo que la Secretaria de Comunicaciones y Transporte (SCT, 2016) recomienda correlacionar la información con reconocimientos de superficie (afloramientos, fracturas, fallas, grietas, etc.) y con prospecciones geofísicas.

Con respecto a los métodos indirectos de prospección geofísica, los estudios geoeléctricos resistivos que se utilizan, con mayor frecuencia en hidrogeología son; el sondeo eléctrico vertical (SEV), en su modalidad de calicata (C.E) o de tipo de perfil y la tomografía eléctrica (TER), estos métodos geoeléctricos, miden la resistividad aparente (ρ_a) en el subsuelo.

La resistividad aparente es determinada por la combinación de valores de resistividad real de los diferentes materiales del suelo a partir de la inducción de una corriente eléctrica, aplicando un conjunto de técnicas físicas y matemáticas, permitiendo identificar diferentes formaciones litológicas, su permeabilidad, estratigrafía de la roca de lecho, la profundidad de la capa freática o la zona de formaciones saturadas, el espesor de las zonas meteorizadas, el establecimiento de su profundidad, espesor y extensión lateral de los acuíferos, intrusión de agua dulce y/o salada, zonas prospectivas de aguas subterráneas, fracturas y otras características (Sampath y Swathi, 2015).

La base matemática del método se concentra en las ecuaciones de Maxwell y Faraday, sobre el campo eléctrico y la relación con la ley de Ohm en un plano vectorial (Samouëlian et al. 2005). Donde se relaciona el campo eléctrico (\vec{E}), y la densidad de corriente (\vec{J}).

Considerando que el campo eléctrico en corriente continua se encuentra en estado estacionario se puede expresar en función del potencial eléctrico (Quintana y Teixidó, 2015), de acuerdo con la ecuación (3).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (3)$$

Además, el campo eléctrico cuya rotación es cero se expresa mediante el gradiente de una función escalar; conocida como potencial eléctrico.

$$\vec{E} = \vec{\nabla} U \quad (4)$$

Al colocar un electrodo en el suelo y dejar pasar una determinada cantidad de corriente (I), se forma un campo eléctrico que describe la superficie de una semiesfera (siempre y cuando se considere un medio homogéneo) en donde la densidad de corriente (J) tendrá el mismo valor en todos los puntos, de modo que la integral de (\vec{J}), en toda la superficie semiesférica debe ser igual a la intensidad de corriente inyectada, considerando el radio de la semiesfera (r);

$$2\pi r^2 \cdot J = I \quad (5)$$

Por lo tanto;

$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (6)$$

Obteniendo;

$$|E| = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{I \rho}{2\pi r^2} \quad (7)$$

Con base a lo anterior para cualquier electrodo; el valor del campo \vec{E} , es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (r).

Haciendo referencia a la expresión de campo eléctrico y posicionando dos electrodos (M, N), separados por una distancia r_1 y r_2 , con respecto al electrodo de corriente (referencia), la diferencia de potencial (ΔU) entre los puntos se puede expresar;

$$\Delta U_N^M = - \int_N^M E \cdot dI \quad (8)$$

Finalmente se obtiene la expresión, que hace referencia a la diferencia de potencial eléctrico entre los electrodos de corriente y las distancias de separación entre ellos;

$$\Delta U_N^M = \Delta V_{MN} = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{dr^2} = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (9)$$

Cuando un electrodo es colocado en la superficie de un terreno homogéneo e isotrópico, con resistividad I , el potencial creado en un punto cualquiera del semiespacio a una distancia r , está definida por (Custodio y Llamas, 2001):

$$V = \frac{\rho}{2\pi} * \frac{1}{r} + C \quad (10)$$

Donde C es una constante que está en función de la resistencia entre el electrodo y el terreno. Esta fórmula es válida para todo el semiespacio.

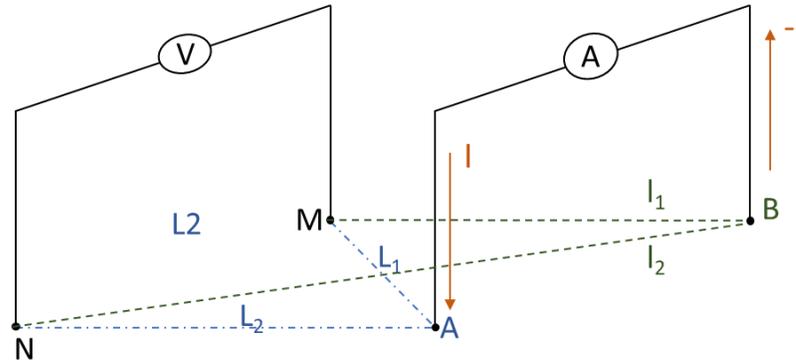


Figura 13. Esquema de un arreglo cuadrupolar. Fuente (Custodio y Llamas, 2001).

Cuando en el terreno se coloca otro electrodo y se cierra el circuito, se tendrá una diferencia de potencial creada entre los puntos M y N (Figura 13), considerando el electrodo de corriente A se expresa:

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{L_1} + C_A + C_M - \frac{\rho I}{2\pi} * \frac{1}{L_2} - C_A - C_N \quad (11)$$

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} \right) + C_M - C_N \quad (12)$$

Mientras que la diferencia de potencial en el punto B se representa;

$$V_{M'} - V_{N'} = \frac{\rho(-I)}{2\pi} * \frac{1}{l_1} - C_B - C_M - \left(\frac{\rho(-I)}{2\pi} * \frac{1}{l_2} + C_B + C_N \right) \quad (13)$$

$$V_{M'} - V_{N'} = -\frac{\rho(I)}{2\pi} * \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2}\right) - C_M + C_N \quad (14)$$

La diferencia de potencial creado por el circuitito en MN queda:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} - \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2}\right) \quad (15)$$

Por lo tanto, la resistividad del terreno se define por:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left(\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} - \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2}\right)^{-1} \quad (16)$$

La aplicación de la ecuación (16), permite obtener la resistividad real del terreno, si este es homogéneo e isótropo. Si en el subsuelo existen varios tipos de materiales, la resistividad obtenida es una especie de media, de un cierto volumen del terreno, la cual es llamada resistividad aparente.

Estas técnicas eléctricas resistivas, permiten generar secciones geoelectricas que son imágenes que reflejan las diferentes unidades geológicas, que se caracterizan por rangos de resistividades diferentes (ρ_i) y espesores (h_i). La resistividad eléctrica que presentan los diversos materiales del suelo es lo que hace posible la aplicación estas técnicas (Telford et al., 2004).

Cuando el objetivo de esta técnica es la localización de acuíferos, así como su forma, extensión, dimensiones, condiciones hidrológicas y geológicas, que puedan proporcionar una idea cualitativa de la posible disponibilidad de agua subterránea. Se recomienda la aplicación de dos o más técnicas geofísicas, así como el uso de fotografías aéreas, planos geológicos, reconocimiento de exploración hidrológica y geológica, información existente de la litología de pozos de extracción de agua subterráneas de zonas aledañas al área de interés, esto permitirá una interpretación más certera de las características del acuífero y su potencial de extracción (Reyes, 2016).

En las últimas décadas, los estudios geoelectricos resistivos han presentado avances con el uso de la técnica de Tomografía eléctrica vertical (TER), método que combina la sensibilidad lateral (sentido horizontal) para detectar variaciones en el potencial eléctrico, como en sentido vertical (a profundidad). Se considera como la fusión de la aplicación de la técnica del sondeo eléctrico vertical (SEV) y la técnica de calicata eléctrica (C.E.), de esta manera se obtienen cortes de perfiles que detectan variaciones de resistividad a profundidad y lateralmente (Loke, 1997).

La tomografía de resistividad eléctrica (TER), es una herramienta importante en la caracterización del suelo y procesos de infiltración, se considera un método multielectrónico, y requiere una gran cantidad de datos de resistividad aparente (ρ_a), para lograr procesar la información y obtener las imágenes en 2D o 3D. Afortunadamente en los últimos años se ha presentado un desarrollo importante, a través de la mejora continua de los equipos para la obtención de datos, así como avances relevantes en los programas de inversión para su interpretación, logrando que la utilización de TER sea cada vez más frecuente en el estudio de suelos y acuíferos.

La selección de los dispositivos multielectrónicos que mejor se adaptan a cada caso de estudio, es relevante para obtener resultados adecuados al área de interés. Existe un gran número de arreglos electrónicos, el criterio de selección es la extensión y profundidad de la zona de estudio, así como la geología y condiciones topográficas. Los arreglos electrónicos, más comunes son; los arreglos electrónicos lineales; simétricos (Schlumberger, Wenner, Lee, dipolo) y asimétricos (semi-Schlumberger, semi-Wenner), arreglos dipolares (arreglo perpendicular, ecuatorial, paralelo, radial, axial).

Los estudios de prospección geofísica utilizados en el desarrollo de este trabajo corresponden a la aplicación de técnicas geofísicas indirectas como el método

resistivo de sondeo eléctrico vertical (SEV) y la tomografía eléctrica (TER), debido a que son fáciles de realizar, de bajo costo y no destructivos.

Además, la Universidad Autónoma Chapingo cuenta con el equipo de prospección geoelectrica resistiva. Se utilizó para los sondeos eléctricos verticales un Georesistivimetro Terrameter SAS-300B con su respectiva unidad reforzadora Terrameter SAS-200 (Figura 14 a), mientras que, para las Tomografías eléctricas verticales, el Tomógrafo (ABEM, 2010) modelo Terrameter LS (Figura 14 b).



Figura 14. Equipos de prospección eléctrica resistiva, a) Georesistivimetro SAS 300B, b) Tomógrafo Terrameter LS 100.

Para mapear la zona del acuífero, se logró obtener información de 186 sondeos eléctricos verticales y 24 Tomografías eléctricas, los cuales fueron utilizados para determinar la capa resistiva y el espesor de la zona no saturada del acuífero. Los arreglos utilizados en el mapeo de la zona no saturada del acuífero fueron principalmente de tipo Schlumberger y Gradiente.

Los estudios de prospección geoelectrica para ambos arreglos consisten en inyectar corriente eléctrica al terreno a través de un par de electrodos AB para medir la respuesta de los materiales del subsuelo al flujo de corriente en otro par de electrodos MN (Koefoed, 1979; Parasnis, 1997; Orellana, 1982).

La ventaja del arreglo Schlumberger es asegurar que éste minimiza la variación lateral de cambios en la geología, así como el efecto superficial y aumenta la profundidad de penetración de la corriente, mientras que con el arreglo de tipo gradiente, utilizado en el Tomógrafo, presenta la ventaja de realizar la detección de resistividad aparente, tanto en la vertical como de manera lateral, la desventaja es que no alcanza a detectar las variaciones de resistividad aparente a profundidad, como el arreglo Schlumberger.

Las lecturas de la resistencia R (ley de Ohm, $R = \frac{\Delta V}{I}$), del volumen del material geológico dentro del espacio eléctrico de la configuración electródica, se obtienen de las mediciones en campo. Del producto del factor geométrico (K) y R, se determinó la resistividad aparente ρ_a , para cada una de las capas litológicas detectadas, utilizando las ecuaciones (17) y (18).

Para cada arreglo y cada lectura de resistencia, se calcula el factor geométrico respectivo. La Figura 15, muestra un esquema del arreglo Schlumberger del SEV usado en este trabajo. Mientras que en la ecuación (18) representa el factor geométrico de este arreglo.

$$\rho_a = K \left(\frac{\Delta V}{I} \right) = KR \quad (17)$$

$$K = \pi \left[\frac{\left(\frac{AB}{2} \right)^2 \left(\frac{MN}{2} \right)^2}{MN} \right] \quad (18)$$

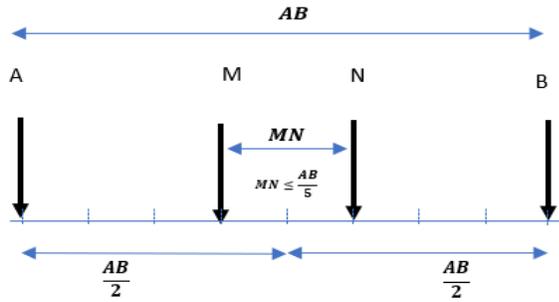


Figura 15. Esquema del arreglo Schlumberger.

En caso de la recolección de datos con el Tomógrafo (ABEM) Terrameter LS 100, la cual se considera como una técnica multielectrónica (21 electrodos por cable), se usó el arreglo tipo Gradiente (Figura 16), y el factor geométrico determinado por la ecuación siguiente, (Geotomo, 2019) .

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1}\right) - \left(\frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3}\right) + \left(\frac{1}{r_4}\right)\right]} \quad (19)$$

Donde; $r_1 = na$; $r_2 = (n + 1)a$; $r_3 = (s + 2 - n)a$; $r_4 = (s + 1 - n)a$

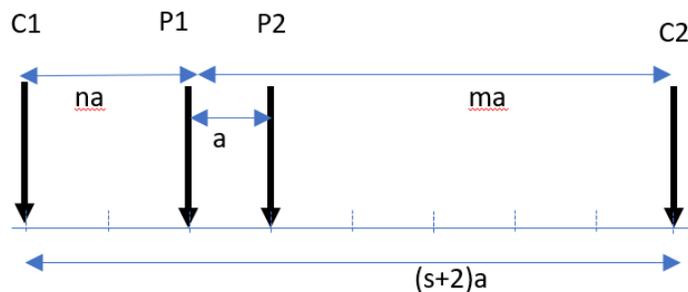


Figura 16. Esquema de arreglo interelectrónico tipo gradiente.

Para la instalación, en campo, de los equipos de prospección geofísica de tipo resistivo, se ubicó un punto estratégico, el cual tuvo como función ser la estación o punto central y partir de ahí se realizó el tendido de los cables, hacia uno y otro extremo. Una vez instalado todo el equipo se comienza con el sondeo eléctrico vertical y/o tomografía eléctrica, con el arreglo seleccionado se tuvo especial cuidado en la toma de datos, debido a que en ocasiones el equipo detectaba material muy conductor, provocando falla en la medición.

Para el procesamiento de los datos, con el equipo de Tomografía eléctrica (TER), se utilizó el software *RES2DIVN*, mediante el cual se obtuvo el modelo de resistividades en 2D a partir de la pseudosección de resistividades aparentes obtenidas del sitio de estudio. El software (*RES2DINV*), realiza el tratamiento de datos por modelo de inversión, con la finalidad de realizar la distribución de resistividades de la sección del subsuelo, al modelo que mejor se ajuste con base a las mediciones de resistividad obtenidas sobre la superficie (Geotomo, 2019; Loke et al., 2013).

El procesamiento de datos que realiza el software para obtener el modelo de inversión comprende; generar un cierto número de bloques rectangulares de resistividad aparente constante, donde el número de bloques generados es igual al número de puntos medidos y el ancho de cada bloque está en función al espaciamiento de los electrodos. Posteriormente se ajustan los datos con un método de optimización iterativo para minimizar la diferencia entre resistividades aparentes calculadas (modelo seleccionado) con las obtenidas en campo, en este trabajo se utilizó el modelo de ajuste de mínimos cuadrados con suavizado. De esta manera se obtiene una matriz correctora del modelo inicial.

La ecuación (20), se utiliza como solución recurrente en los procesos de inversión, reemplazando las curvas de sondeo. La ecuación comúnmente utilizada

para el proceso de inversión en datos ajustado por mínimos cuadrados con procesamiento de suavizado es;

$$(J^T J + \lambda C^T C) \Delta P = J^T \Delta g \quad (20)$$

Dónde:

Δg Diferencia entre los datos medidos en campo en la iteración y la resistividad aparente calculada a partir de la modelación (elementos o diferencias finitos)

J Matriz Jacobiana que contiene las derivadas parciales de la resistividad del bloque con respecto a los demás bloques

ΔP Vector corrector de los parámetros del modelo

C Filtro variación vertical y/o horizontal

λ Factor de amortiguamiento. Se selecciona de acuerdo con el nivel de perturbación de los datos entre (0.2 - 0.04). Considerando el valor máximo para la primera iteración

Cada vez que se utiliza la ecuación (20), se genera una matriz columna ΔP que corrige los parámetros iniciales que servirá para la obtención de un nuevo modelo. Y así sucesivamente, hasta que los valores de resistividad del nuevo modelo de bloques se encuentran utilizando consecutivamente la expresión (21);

$$P_{i-1} = P_i + \Delta P \quad (21)$$

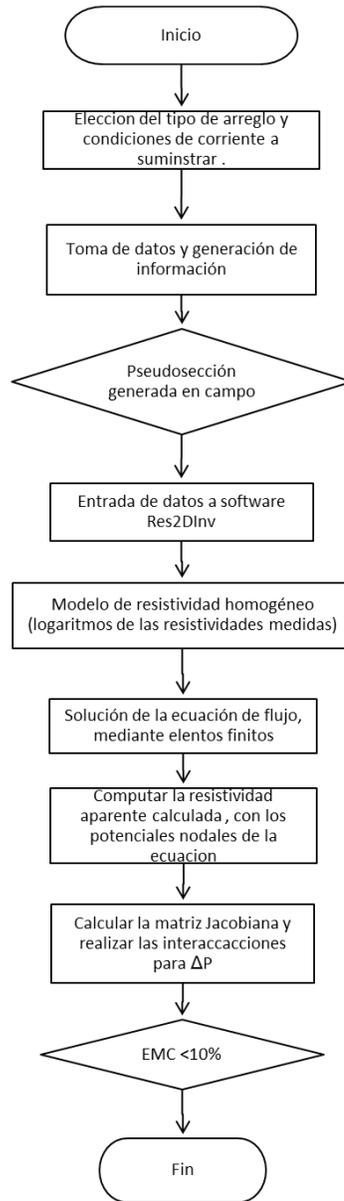


Figura 17. Diagrama de flujo para obtener pseudosecciones de resistividad aparente con modelo de inversión. (Fuente: Briceño y Avellaneda, 2001).

La convergencia del modelo se aprecia cuando el modelo de las pseudosecciones de resistividades calculadas convergen con las resistividades tomadas en campo con un error medio cuadrático menor al 10 %.

El diagrama de flujo, propuesto por Briceño, (2001) explica las etapas del modelo de inversión para generar las pseudosecciones eléctricas (Figura 17).

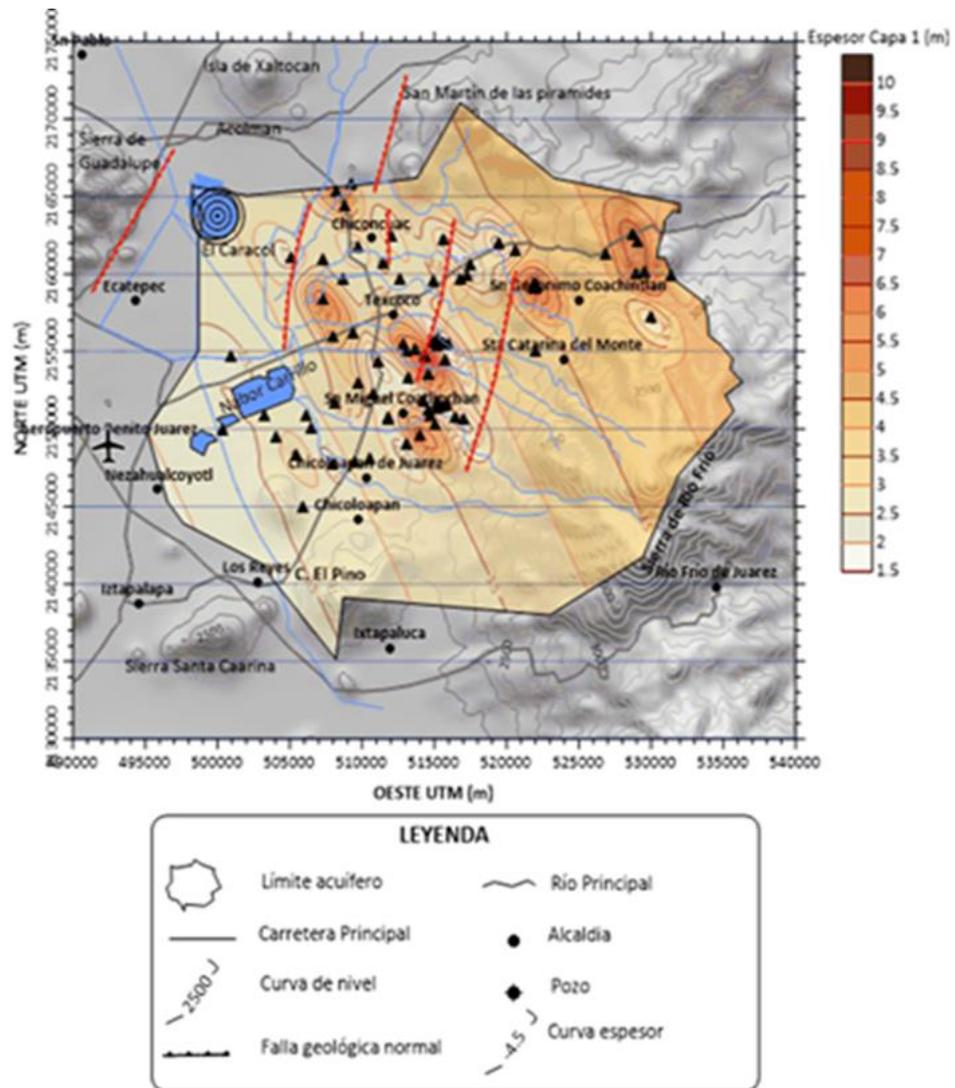


Figura 18. Espesor (m), de la capa superior del acuífero de Texcoco.

Los resultados de valores de resistividad y espesor de las capas detectadas con el método geoelectrico, en el proceso de inversión de datos, y utilizando Surfer

V16, permitió obtener información de la litología del subsuelo y el espesor de la cobertura superior del suelo (Figura 18).

En la zona centro, norte y hacia el este del acuífero se detectaron variaciones en resistividad aparente que oscilan entre 50 -150 ohm·m, lo que indica material que puede retener agua debido a su porosidad, en la zona centro con dirección hacia el sureste se localizaron los valores de resistividad mayores de la zona de estudio (650-1150 ohm·m), valores típicos de material poco fracturado de tipo volcánico (andesita y dacita) debido a la cercanía con la Sierra de Río Frío, igualmente se localiza material poco fracturado en localidades como San Jerónimo Amanalco. Las zonas detectadas como propicias para contener agua en la superficie porosa de la roca son aquellas con valores de resistividad aparente de entre 50 y 250 ohm·m (Figura 19).

Con ayuda de los estudios geoelectricos resistivos, se logró localizar la capa base del acuífero y las resistividades aparentes del material que lo conforman.

Identificando espesores prácticamente nulos al noreste del acuífero (Figura 20) y resistividades aparentes de 150 a 250 ohm·m (Figura 21), lo que indica que son zonas con material poroso que tienen la capacidad de permitir el paso de agua hacia las zonas de menor altitud. La zona identificada con resistividad del orden de entre 850 a 1050 ohm·m, se ubican en la zona poniente, generando un carácter de confinamiento al acuífero, debido a la presencia de material no fracturado en la base del acuífero.

La mayor parte de la base del acuífero presenta resistividades aparentes entre 50 y 250 ohm·m, lo que indica que es una zona capaz de albergar agua y trasmitirla en cantidad suficiente para su explotación.

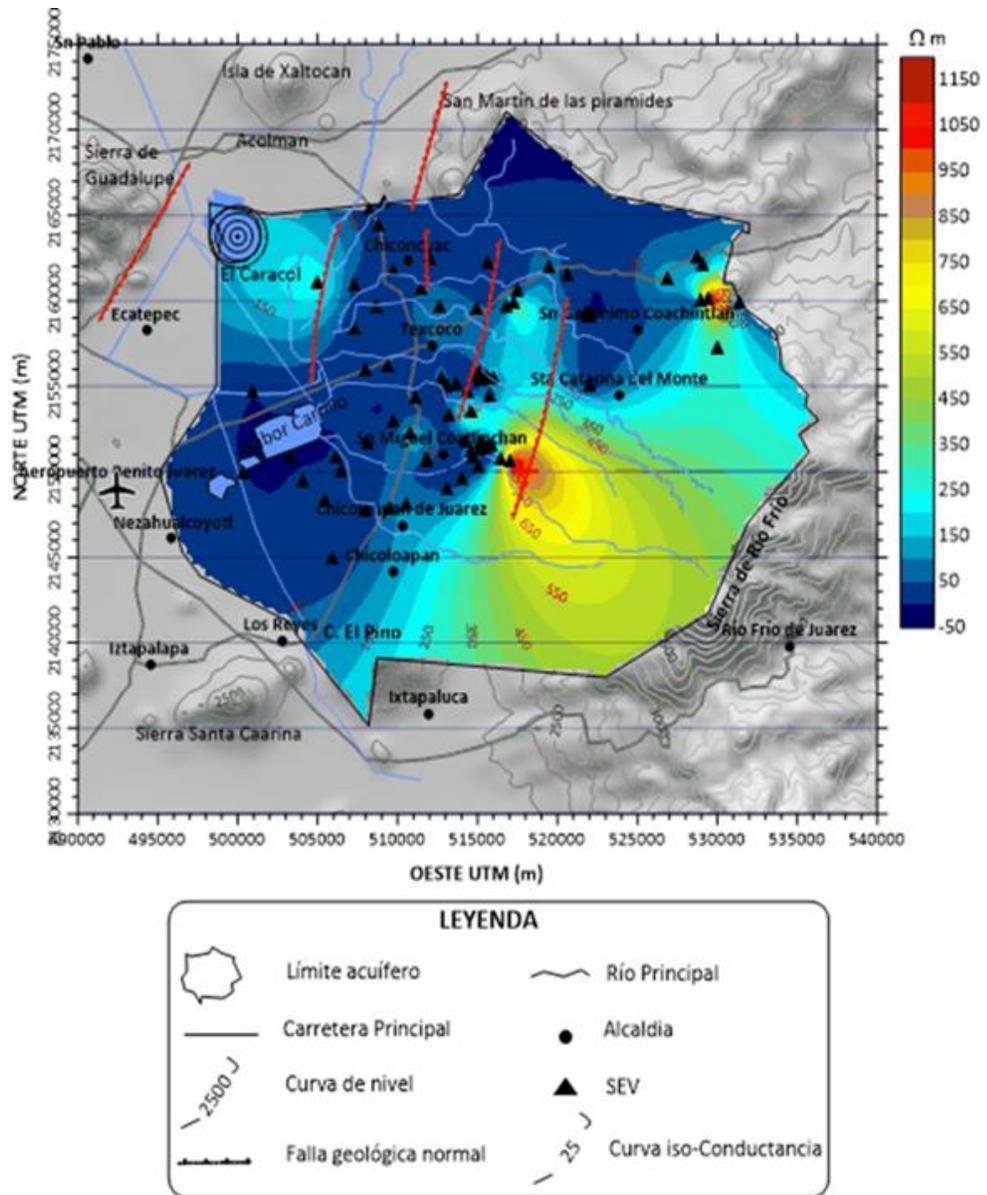


Figura 19. Distribución de las resistividades aparentes de la capa superior del suelo, área del acuífero de Texcoco.

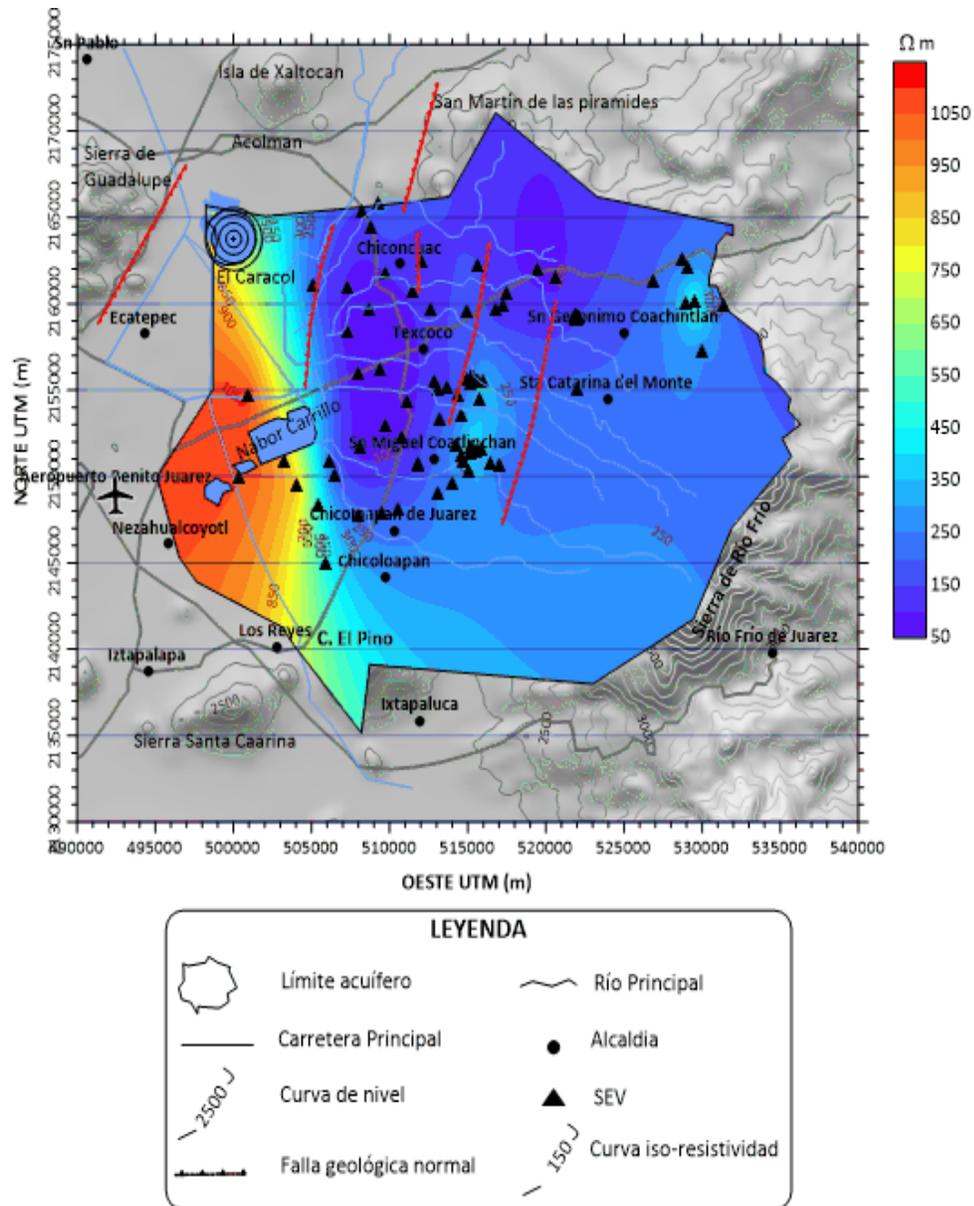


Figura 21. Resistividad de la capa base del acuífero ($\text{ohm} \cdot \text{m}$), considerando la profundidad máxima lograda en cada estudio geoelectrico.

La información recopilada del área de geohidrología de la carrera de Ingeniero en Irrigación de la Universidad Autónoma de Chapingo se completó con estudios geofísicos de sondeos eléctricos verticales y Tomografías eléctricas, realizadas

en la zona para propósitos de este trabajo de investigación. La información de los Sondeos eléctricos verticales y Tomografías eléctricas se encuentra formando una base de datos en el área de geohidrogeología de la Universidad Autónoma Chapingo

En general, la información de los SEV's y TER, se utilizaron para determinar y mapear la capa resistiva, el espesor de la zona no saturado del acuífero y representar perfiles de la zona del acuífero de Texcoco.

2.6. Infiltración básica y Conductividad hidráulica Saturada

La infiltración es la entrada del agua al suelo, a través de la interfaz atmósfera-suelo, constituye la parte más importante del movimiento del agua en el suelo, y representa una de las etapas más importantes del ciclo hidrológico (Hillel, 2004).

La infiltración del agua en la matriz suelo, se realiza a través de la porosidad que tiene el material, obedece a gradientes del potencial hídrico y a la capacidad del suelo para permitir el paso del agua a través de los intersticios. La infiltración es un factor clave en aspectos de hidrología, Ingeniería ambiental, agrícola y civil. Es un proceso sumamente complejo que depende de una gran cantidad de variables como; las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, la composición química del fluido, la precipitación, el tiempo transcurrido desde que el fluido (agua) toca la superficie del suelo, variabilidad espacial y distribución de las propiedades hidráulicas dentro del perfil del suelo, así como las condiciones iniciales y de frontera del sistema.

Durante el siglo pasado, se han realizado esfuerzos para comprender la física de la infiltración y el desarrollo de modelos cuantitativos para predecir la dinámica de este proceso. En las últimas décadas, la investigación de este proceso ha sido significativa, en aportaciones fundamentales del proceso de infiltración, como las propuestas por: Green, Ampt, Horton, Philip, Brutsaert, Parlange y muchos otros científicos (Morbidelli et al., 2018)

Cuando un fluido entra en contacto con un medio poroso seco, humedece el material e induce un flujo en el material poroso debido a la capilaridad. Cuando este movimiento ocurre en ausencia de fuerzas de gravedad (como en el flujo horizontal), se considera un proceso de “sorción”. Cuando ocurre bajo la influencia de la gravedad, se considera un proceso de “infiltración” (Assouline, 2013).

En el momento en que el agua ingresa al suelo, desde la superficie de la Tierra, incrementa la disponibilidad de agua para alimentar a las plantas, y colabora en la recarga de embalses de agua subterránea. Cuantitativamente es la cantidad de lámina de agua que se infiltra en el suelo, desde un área determinada en un intervalo de tiempo. A medida que ingresa un volumen de agua, la velocidad de infiltración disminuye debido a que el suelo se satura, y alcanza una velocidad de infiltración cada vez menor, hasta llegar a ser casi mínima, esto es porque al paso del tiempo (tiempo de infiltración efectiva), el suelo ya no es capaz de aceptar más agua infiltrada, por lo tanto, se llega al punto de saturación, esto demuestra que la velocidad de infiltración está en función del tiempo (Maldonado, 2001).

Si se expresa matemáticamente y se grafican los valores de tiempo y velocidad de infiltración se observa un comportamiento de una función exponencial (Figura 22).

Esto dio lugar a las ecuaciones y explicaciones de los investigadores que han aportado ideas fundamentales al proceso de infiltración como; Horton, Kostiakov, Phillips, Lewis, Elrick, Reynolds.

Las medidas de infiltración son importantes para el modelado hidrológico de captación (Olalla et al., 2005).

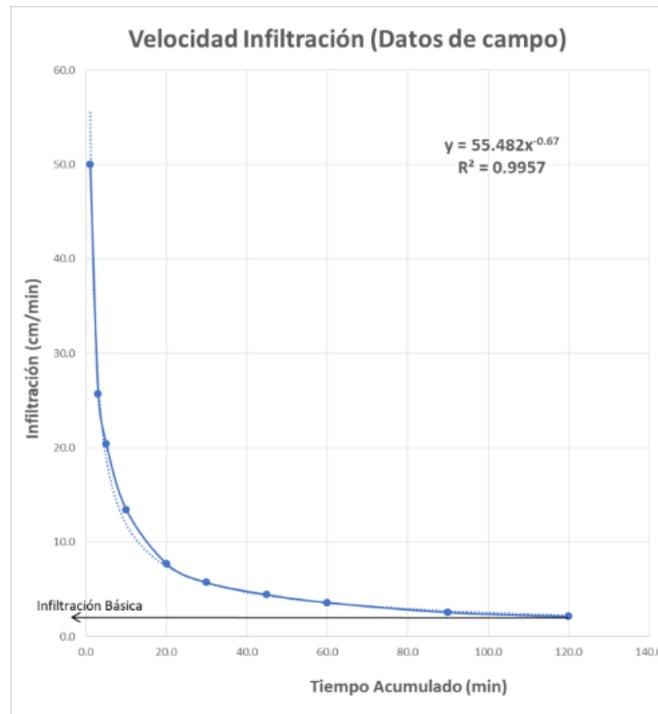


Figura 22. Curva de Infiltración tipo exponencial.

La conductividad hidráulica saturada (K_s), está relacionada en forma directa con la medida de velocidad de infiltración, cuando el suelo está saturado. Por lo que, para determinar K_s , se ha recurrido al uso de diferentes métodos para determinar cuantitativamente la velocidad de infiltración, en un suelo saturado. Algunos de los modelos que explican el proceso de infiltración y relacionan los parámetros medidos en campo con ecuaciones matemáticas han sido expresados de la siguiente manera;

Modelo de Kostiakov

Kostiakov (1932), propuso un modelo el cual se basa en la lámina de infiltración acumulada y en la determinación de las constantes, que son calculadas de gráficas a partir de datos empíricos, la ecuación propuesta por Kostiakov tiene la siguiente expresión;

$$f = at^b \quad (22)$$

Cuando el tiempo es muy grande, la velocidad de infiltración se estabiliza (valor constante), logrando relacionarse con la velocidad de infiltración básica;

$$-t > \infty \quad f = f_{básica}$$

Por lo tanto, derivando la ecuación 22 en función del tiempo, se tiene;

$$F = \frac{at^{b+1}}{b+1} \quad (23)$$

$$\text{Si; } A = \frac{a}{b+1}; \quad B = b + 1$$

Entonces

$$F = At^B \quad (24)$$

$$Y = \log(F), \quad A_0 = \log(a); \quad X = \log(t)$$

Donde;

$$B = \frac{n(\sum xy - \sum x \sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (25)$$

$$A = \text{antilog}(A_0) = \text{Antilog}\left(\frac{\sum y}{n} - B \frac{\sum x}{n}\right) \quad (26)$$

Y el coeficiente de correlación se calcula:

$$r^2 = \frac{\left(\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}\right)^2}{\left(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}\right)\left(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}\right)} \quad (27)$$

Donde; A, a, B, b y n ; no tienen un significado físico y se obtienen de los datos experimentales, al ajustar la ecuación. La resolución se obtiene al graficar los valores de la lámina infiltrada contra el tiempo, y se ajusta por mínimos cuadrado,

para finalmente determinar la infiltración básica, la cual es numéricamente igual a la conductividad hidráulica saturada (K_s).

Por lo tanto, F , representa la constante de infiltración para $t \sim \infty$ teniendo en cuenta que n es negativa, la velocidad de infiltración tenderá a F cuando el tiempo aumente. F en este caso, es equivalente a la infiltración básica (Alvarado y Barahona, 2017).

El Modelo de Horton (1939). Es un modelo empírico, propuesto por numerosas observaciones experimentales. Expresa matemáticamente la curva de la capacidad de infiltración (I) y la velocidad de infiltración (i), corresponde a un modelo de tres parámetros a calcular, (Weber, 2014). Estos parámetros están asociados a los suelos y su cubierta vegetal.

$$I = I_b + (I_i - I_b)[e^{-kt}] \quad (28)$$

La ecuación del volumen infiltrado acumulado en función del tiempo se expresa.

$$i = I_b t + \frac{f_i - f_b}{k} [1 - e^{-kt}] \quad (29)$$

I_b *velocidad de infiltración final (cm h⁻¹)*

I_i *velocidad de infiltración inicial (cm h⁻¹)*

e^{-kt} *base de logaritmo a la potencia - kt*

k *constante (h⁻¹)*

t *tiempo (h)*

Según Horton (1940), la disminución de la tasa de infiltración, después de un tiempo, empequeñece por una serie de factores como; el cierre de los poros del

suelo por hinchazón o depósito erosivo, compactación por impacto de gotas de lluvia, etc., (Lal y Shukla, 2005). Además, establece que la curva que representa la capacidad de infiltración solo es válida cuando la capacidad de infiltración del suelo en estudio es menor al volumen de precipitación. La solución numérica de esta ecuación se puede realizar por ajuste de mínimos cuadrados (graficando en escala logarítmica tiempo y velocidad de infiltración) o por programación lineal de método simplex.

La tasa de infiltración básica (velocidad mínima de infiltración) I_b , teóricamente, se puede considerar igual a la conductividad hidráulica, sino estuviera presente el efecto del aire comprimido en el interior del suelo, obstaculizando la infiltración. Por eso I_b es normalmente menor a K_s , (Alvarado y Barahona, 2016).

Otro método utilizado en campo es con ayuda del permeámetro de Guelph, aplicando las ecuaciones descritas por Elrick y Reynolds (1986). Tiene su fundamento en el principio del frasco de Marriot, con carga hidráulica constante en un pozo pequeño (diámetro aproximado de 6 cm) perforado en el suelo. Se determina el valor de la conductividad hidráulica saturada en campo (K_{fs}), a partir de mediciones de velocidad de flujo de agua, infiltrándose en el subsuelo, a través del pozo con un radio (a) y altura constante (H), en un medio poroso, homogéneo e isotrópico, se puede determinar a partir de la ley de Darcy, ya sea que el suelo se encuentre totalmente saturado o no, intervienen tres direcciones en la velocidad del flujo de agua;

$$v_{rp} = -K(\psi) \cdot \frac{d\psi}{dr}; \quad r = a \quad (30)$$

$$v_{zp} = -K(\psi) \cdot \frac{d\psi}{dz}; \quad z = 0 \quad (31)$$

$$v_g = -K(\psi) \cdot \frac{d\psi_z}{dz}; \quad = -K_{fs} \quad (32)$$

Así el caudal infiltrado en el pozo se expresa:

$$Q = \int_{A_p} V_{rp} dA_p + \int_{A_b} V_{zp} dA_b + \int_{A_b} V_g dA_b \quad (33)$$

Al desarrollar la ecuación (33), se obtiene la expresión para determinar el caudal de infiltración;

$$Q = \frac{2\pi H^2}{C} K_{fs} + \frac{2\pi H}{C} + \frac{K_{fs}}{\alpha} + \pi a^2 K_{fs} \quad (34)$$

La ecuación (34), considera; el flujo de agua en la zona saturada como en la no saturada, alrededor del pozo. Así como la velocidad de infiltración a través de la base y las paredes del pozo por influencia de un gradiente de presión (carga hidráulica), incluye también, la presión que ejerce la fuerza de gravedad. El factor C, se determina mediante una solución numérica que se expresa con la ecuación (35):

$$C = 4 \left[\frac{1}{2} \operatorname{Senh}^{-1} \left(\frac{H}{2a} \right) - \sqrt{\left(\frac{a^2}{H} \right) + \frac{1}{4} + \frac{a}{H}} \right] \quad (35)$$

Con respecto al tiempo para determinar el valor de la infiltración básica se ubicaron en bibliografía tres criterios; el primero es de tipo gráfico, el cual ubica el valor de infiltración básica, cuando la curva exponencial presenta tendencia asintótica, y se proyecta a la ordenada “y”. La expresión matemática define la infiltración básica como el valor en que la variación de la velocidad de infiltración respecto al tiempo es menor o igual al 10%, conforme lo establecido por el Centro

Nacional de Estudios de suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA-NSSC), expresado como;

$$t_{1b} = -600 b \quad (36)$$

Donde b es el exponente de la ecuación de Kostiakov para cada punto de estudio.

Y, por último, se determina la velocidad de infiltración cuando el tiempo para llegar al valor óptimo de infiltración básica está en función de ambas constantes de la ecuación de Kostiakov; esta ecuación también fue propuesta por USDA-NSSC de Estados Unidos, y es frecuentemente aplicada en Argentina (PROSAP. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Argentina, s/f)

$$T_b = \left(\frac{-0.1}{k * -n} \right)^{\frac{1}{m-2}} \quad (37)$$

Donde: $-n = b$; $m = 1 + b$ y $k = a * b * 10 * 60$

Para lograr determinar la capacidad de infiltración de suelo (capa superficial) que comprende al acuífero de Texcoco, se delimito en un plano el área de estudio abarcando un total de 64 celdas, lo cual permitió realizar un mallado de 8X8 celdas, con la finalidad de cubrir la zona de interés (Figura 23).

Se realizaron 120 pruebas de infiltración para el método del permeámetro de carga constante Guelph, mientras que para el equipo de doble cilindro se realizaron 60 pruebas de infiltración. Así como también se realizaron análisis fisicoquímico a las muestras de suelo recolectadas. La recolección de muestra, medidas de infiltración, así como algunos análisis (pH y conductividad), se realizaron y determinaron en campo, mientras que análisis de textura (Bouyoucos), metales pesados, pH, conductividad electrolítica al estrato saturado, densidad aparente, entre otros, se realizaron en el laboratorio de

Química del departamento de Irrigación y en el laboratorio de Química de la carrera de Ingeniería Ambiental en la Universidad Tecnológica del Valle de Toluca. Para establecer las zonas de muestreo y los puntos de medición, se realizó un recorrido por el área y se ubicaron los puntos de trabajo con un GPS Gamín en el momento de la colección de las muestras.

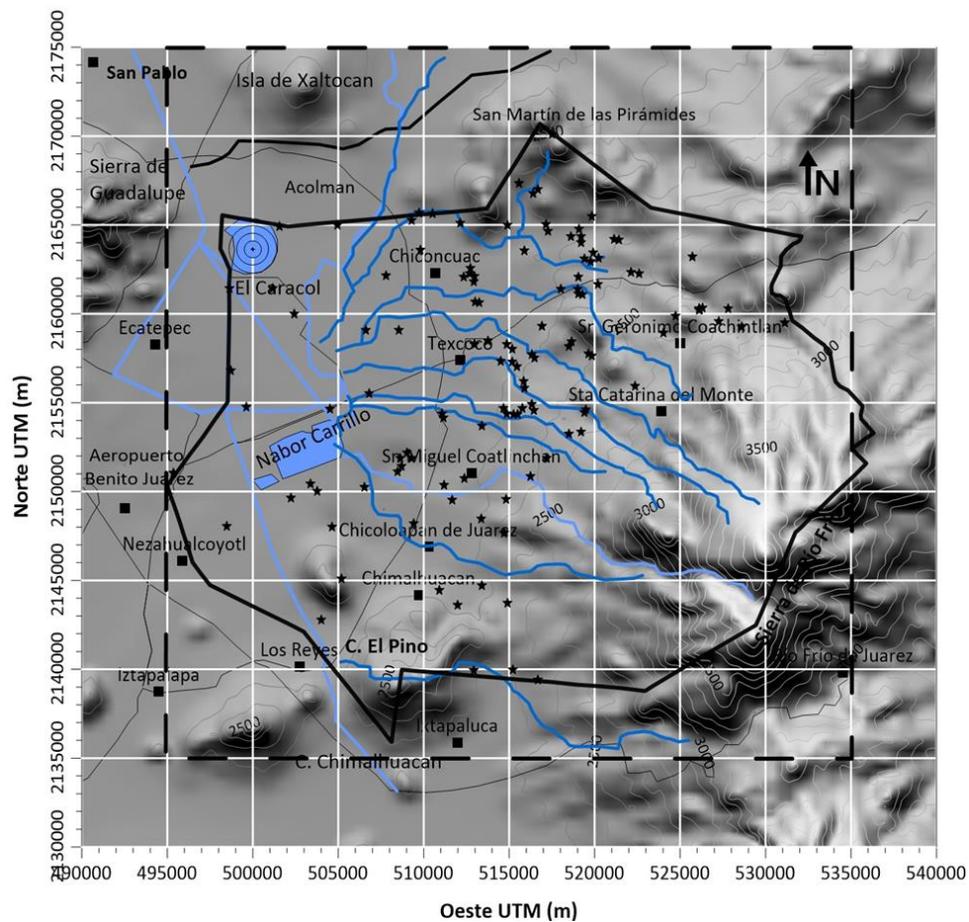


Figura 23. Delimitación del área de estudio y ubicación de los puntos de muestreo en el acuífero de Texcoco.

La zona que comprende el acuífero de Texcoco, no se muestreo en su totalidad debido a las zonas pobladas, donde no es posible la toma de muestra del suelo original, consecuencia del crecimiento de la mancha urbana, algunas de estas

zonas presentaron materiales de relleno que se compactaron para la edificación de construcciones. Otra limitante para el muestreo fue el acceso restringido por algunas comunidades o por particulares como es la zona minera y la zona poniente del acuífero de Texcoco donde el acceso se encuentra restringido por las obras del nuevo aeropuerto internacional de la ciudad de México (NAICM). La superficie de estudio abarcó la zona central y oriente del acuífero, así como algunos puntos aislados de la zona poniente del acuífero.

Las muestras de suelo recolectadas fueron tomadas con dos tipos de criterio para el muestreo; simple tipo puntual y compuesto de tipo estratificado radial. El muestreo simple tipo puntual se realizó en zonas de acceso controlado y/o difícil acceso por la topografía o restricciones de entrada, mientras que el muestro sistemático tipo radial, para la obtención de muestras compuestas fue el utilizado con mayor frecuencia (85%), en el área de trabajo. Para la preparación de las muestras y su posterior análisis, se siguió la metodología que marca la norma NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos; en los apartados respectivos (AS-01; AS-07)

Con apoyo en las medidas realizadas en campo de infiltración básica se logró la determinación de la K_{fs} con un enfoque macroscópico, aplicando los modelos desarrollados por; Kostiakov, Horton, Reynolds y Elrick. En la recopilación de datos y la información referente a la velocidad de infiltración del suelo, se siguieron dos procedimientos; la medición de infiltración con doble cilindro y la determinación de la conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) con el permeámetro Guelph.

Los datos y mapeo de estudio, sirvió como base para el desarrollo del capítulo 4, con la intención de publicar el artículo generado.

2.7. Comentarios generales

El acuífero de Texcoco es de gran importancia en la región oriente del estado de México, debido a la cercanía que tiene con la Ciudad de México y por considerarse parte de la zona conurbana de esta gran ciudad. El crecimiento poblacional y desarrollo de esta región ha mermado las reservas subterráneas del acuífero, debido a la extracción excesiva del agua subterránea. Por lo que es importante, tomar medidas a nivel regional y estatal para proteger el acuífero de la contaminación y realizar un uso sustentable del agua subterránea, así como proteger las zonas donde se realiza la infiltración y recarga natural del acuífero.

La realización de mapas temáticos aplicando técnicas geofísicas eléctricas y mediciones en campo, han permitido delimitar zonas susceptibles de infiltrar contaminantes al acuífero, así como identificar el espesor de la capa superficial que lo cubre y le confiere cierta protección al agua subterránea, en ocasiones no es suficiente como por ejemplo la zona poniente del acuífero que presenta materiales lacustres de tipo arcilloso, considerados casi impermeables. En este estudio se identificaron valores de infiltración y resistividad aparente de materiales ligeramente porosos (75 -150 ohm·m) en las inmediaciones del Lago Nabor Carrillo, con la técnica de prospección eléctrica resistiva, por lo que es posible la infiltración de agua en esta zona. Mientras que la zona centro del acuífero presenta materiales con una buena capacidad de almacenamiento de agua y transmisividad para su explotación. La zona oriente del acuífero es la que permite la recarga y movimiento del agua hacia las zonas de menor gradiente hidráulico, localizadas en la planicie (zona central y poniente) del acuífero, por lo que se debe tener especial cuidado de evitar que fuentes puntuales o difusas contaminen la zona no saturada del acuífero.

El realizar un mapeo en la zona de interés, permite fácilmente, identificar zonas importantes de protección para el acuífero de Texcoco.

2.8. Literatura Citada

Aguilar, D. Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., y Delgado, C. (2013). Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación de Acuíferos Kársticos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16(2),243-263. [fecha de Consulta 9 de noviembre de 2020. (Redalyc, Ed.) Recuperado el 30 de octubre de 2020, de Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=939/93928324001>

Albinet, M. & Margat, J. (1970) Groundwater Pollution Vulnerability Mapping. *Bulletin du Bureau de Researchs Geologicques et Minieres Bull BRGM 2nd Series*, 3, 13-22.

Alvarado, C. y Barahona-Palomo, M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico. Obtenido de Scielo. *Cuadernos de Investigación UNED* (ISSN: 1659-4266). 9(1), 23-33: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/cinn/v9n1/1659-4266-cinn-9-01-00023.pdf>

Angulo-Jaramillo, R., Vincenzo Bagarello, M. I., & Lassabatere, L. (2016). *Infiltration Measurements for Soil Hydraulic Characterization*. Switzerland: Springer International Publishing.

Assouline, S. (2013). *Infiltration into soils: Conceptual approaches and solutions*. Water Resources Research.

Briceño, L. A., y Avellaneda, L. M. (2001). Modelación del problema inverso en geoelectrica 2D, mediante elementos finitos. *Geofísica Colombiana*.

CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2019). Atlas de riesgos. Consultada en http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/AtlasEstatales/?&NOM_ENT=M%C3%A9xico&CVE_ENT=15

CONAGUA. Comisión Nacional de Agua. (2015). Actualización de la Disponibilidad media anual de agua en el acuífero Texcoco (1507). Estado de México. Obtenido de CONAGUA: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/273113/DR_1507_TEXCOCO_EDOM_X.pdf

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua (2018). Estadísticas de agua en México. Agua Subterránea. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua (2018b). Subdirección Técnica. Acuíferos por Región hidrológico-administrativa. Obtenido de Sistema Nacional de Información del Agua:

ina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&ver=reporte&o=0&n=nacional

Cserna, Z., Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, L., y Mota-Palomino, R. (1988). Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México. ISSN 0185-5530. Obtenido de Instituto de Geología. Universidad Autónoma de México: <https://www.geologia.unam.mx:8080/igl/publs/boletin/bol104>.

Custodio, E., y Llamas, M. (2001). Hidrología subterránea. España: Omega.

DOF. Diario Oficial de la Federación. (2019). Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Texcoco, clave 1507, en el Estado de México, Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. Ciudad de México: SEGOB. SEMARNAT

Escobar-Villagrán, B., y Palacios-Vélez, O. (2012). Análisis de la sobreexplotación del acuífero Texcoco, México. Obtenido de Tecnología y ciencias del agua: <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/273>

Escolero, F. O., Martínez, S. E., Kraslich, S., y Perevochtchikova, M. (2009). Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático. México: CVCCCM-atmosfera. UNAM. Consultado en el Centro Virtual de cambio climático. Ciudad de México: http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/sis_admin/archivos/agua_escolero__inffinal_org.pdf

Estrada, F; Silva, J; Ochoa, S., Moncayo, R; Cruz-Cárdenas, G; Villalpando, F; Ramos, A; Nava, J. (2013). Aplicación del método SINTACS para la determinación de la vulnerabilidad acuífera en la cuenca del río Duero, Michoacán, México. Revista internacional de contaminación ambiental, 29(4), 235-248. Consultada en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992013000400002&lng=es&tlng=es.

Foster, S., & Hirata, R. (1991). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Lima, Perú: Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la salud.

Garfias, J., Franco, R., Llanos, H., y Martel, R. (2017). Estimación de la vulnerabilidad del acuífero del valle de Toluca mediante la combinación de un método paramétrico y el transporte advectivo. Boletín geológico y minero, ISSN 0366-0176, 25-42.

Geotomo Software GS. Consultado el 3 de febrero de 2020, de Resistivity & IP Imaging. Fast Inversions in Windows 7/8/10: 2D & 3D: <http://geotomosoft.com>

González, R., Albornoz, B., Sánchez y Pinto, I, y Osorio Rodríguez, J. (2018). El acuífero Yucateco. Análisis del riesgo de contaminación con apoyo de un sistema de información geográfica. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(4), 667-683. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.04.09>

Hernández-Espriú, Reyna-Gutiérrez, J., Sánchez-León, E., Cabral-Cano, E., Carrera-Hernández, J., Martínez-Santos, P., Colombo, D. (2014). The DRASTIC-Sg model: An extension to the DRASTIC approach for mapping groundwater vulnerability in aquifers subject to differential land subsidence, with application to Mexico City. *Hydrogeology Journal*, 22(6), 1-17.

Hillel, D. (2004). *Introduction to Environmental Soil Physical*. USA: Elsevier.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2015). *Encuesta Intercensal 2015*. México: INEGI. Consultada en <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/>

Jarray, H., Zammouri, M., Ouessar, M., Hamzaoui-Azaza, F., Barbieri, M., Zerrim, A., Yahyaoui, H. (2017). Groundwater vulnerability based on GIS approach: Case study of Zeuss-Koutine aquifer, South-Eastern Tunisia. Consultado en Scielo. Scientific Electronic Library Online. *Geophysical Internacional*: cielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0016-71692017000200157&lng=pt&nrm=iso&tlng=es

Jiménez, B., Marín, L. E., y Morán, D. (2005). El agua en México vista desde la academia. Obtenido de [Agua.org.mx](http://agua.org.mx). Fondo para la comunicación y la educación ambiental, A.C.: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2010/12/El-agua-en-M%C3%A9xico-vista-desde-la-academia.pdf>

Koefoed, O. (1979). *Geosounding principles 1: Resistivity sounding measurements*. 1. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.

Lal, R., & Shukla, M. K. (2005). *Principles of Soil Physical*. New York, USA: Taylor & Francis e-Library.

Lesser, J. M. (30 de agosto de 2005). Lesser y Asociados, S. A. de C. V. Obtenido de El agua subterránea de la Ciudad de México: <http://www.lesser.com.mx/files/05-03-Agua-Subterranea-Cd-Mexico-Sep-2005.pdf>

Loke, M. H. (1997). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. Consultado en Academia.edu:

https://www.academia.edu/11991713/Electrical_imaging_surveys_for_environmental_and_engineering_studies_A_practical_guide_to_2_D_and_3_D_surveys

Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D., Kuras, O., & Wilkinson, P. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics* (95), 135-156.

Lopez-Blanco, J., y Tapia-Varela, G. (2001). Mapa geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: Unidades morfológicas a escala 1:100,000. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(1), 50-65.

Mahlknecht J., Medina-Mejía M. G., Gárfias-Solis J., Cano-Aguilera I. (2006) Intrinsic aquifer vulnerability assessment: validation by environmental tracers in San Miguel de Allende, México. *Environmental Geology*, vol. 51(3), p. 477-491, Springer-Verlag Heidelberg ISSN: 0943-0105 <http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.1007/s00254-006-0344-8>

Maillet R. (1947). The fundamental equations of electric prospecting, *Geophysics*, 12 (4): 529-662. <https://doi.org/10.1190/1.1437342>

Maldonado, R. T. (2001). Manual de Riego Parcelario. Obtenido de FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/prior/recnat/pdf/MR_index.PDF

Mooser, F. (1975). Historia geológica de la cuenca de México. En Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal, 1, 7-38 y un mapa geológico a escala 1:200 000. México

Morbidelli, R., Corradini, C., Saltalippi, C., Flammini, J. D., & Govindaraju, R. S. (2018). Rainfall Infiltration Modeling: A Review. Recuperado el 16 de octubre de 2020, de Water. MDPI: <https://www.mdpi.com/journal/water>

Olalla Mañas, F. M., López Fuster, P., y Calera Belmonte, A. (2005). Agua y Agronomía. España: Mudi-Prensa.

Orellana, E. 1982. Prospección Geoeléctrica en corriente continua. Paraninfo. Madrid. España. 578 pp.

Parasnis, D. S. (1997). Principles of Applied Geophysics. Netherlands: Springer.

Pathak, D. R., & Bhandary, N. P. (2020). Evaluation of groundwater vulnerability to nitrate in shallow aquifer using multi-layer fuzzy inference system within GIS environment. *Groundwater for Sustainable Development*, 11(100470).

Pérez, C. J., y Pacheco, Á. J. (2004). Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. Recuperado el 03 de septiembre de 2019, de Redalyc.org. UAEM: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46780104.pdf>

Prashant, K., Baban, K. S., Debnath, S. K., Praveen, K. T., & Ghanshyam, C. (2015). Index-based groundwater vulnerability mapping models using hydrogeological settings: A critical evaluation. (Elsevier, Ed.) *Environmental Impact Assessment Review*. (51), 38-49.

Prashant, K., Praveen, K. T., & Sanjit, K. D. (2020). *Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping using Drastic Model*. Florida, USA: CRC Press. Taylor & Francis Group LLC.

PROSAP. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Argentina. (s/f). Medición de la infiltración en el suelo (R014). Recuperado el 12 de diciembre de 2019, de Programa de Servicios Agrícolas Provinciales: Consultado en: http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO%20_R014_%20infiltrometro%20doble%20anillo.pdf

Quintana, Á., y Teixidó, M. (2015). Aplicación de la Tomografía eléctrica en la caracterización del deslizamiento de Doña Mencía (Córdoba). Córdoba, Argentina, Universidad de Córdoba. Recuperado el 3 de septiembre de 2020, de Universidad de Córdoba: Consultado en http://www.uco.es/zootecniaygestion/img/pictorex/19_16_48_doc_trabajo_18.pdf

Ramos J., & Rodríguez R. (2003). Aquifer Vulnerability mapping in the Turbio River valley, Mexico: A validation study. *Geofísica Internacional*, 42 (1), 141-156

Ramos-Leal, J. Ramos-Leal, C; Noyola C; Tapia O. (2010). Aquifer vulnerability and groundwater quality in mega cities: Case of the Mexico Basin. Project: Applied Geomatics for Natural Resources. *Environmental Earth Sciences* 61(6):1309-1320. DOI: 10.1007/s12665-009-0434-5

Reyes, A. (2016). *Geología. Introducción a las ciencias de la tierra*. Texcoco, Estado de México: Universidad Autónoma Chapingo.

Reynolds, D., & Elrick, D. E. (1986). A Method for Simultaneous in Situ Measurement in the Vadose Zone of Field-Saturated Hydraulic Conductivity, Sorptivity and the Conductivity-Pressure Head Relationship. USA: Wiley Online Library.

Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., & Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil & Tillage Research*, 173-193.

Sampath, R. M., & Swathi, G. (2015). Vertical electrical sounding in subsurface geophysical investigation in Kanigiri area Andhra Pradesh district, Andhra Pradesh, India. *Advances in Applied Science Research*, 5 (5), 82-86. ISSN: 0976-8610.

SCT. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2016). Manual de diseño y construcción de túneles de carretera. Dirección General de Servicios Técnicos. Obtenido de SCT: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales_Tuneles/CAPO3.pdf

SEMARNAT (2002). NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SENARA. (2018). Mapas de Vulnerabilidad avalados por SENARA. Obtenido de Senara.or.cr: http://www.senara.or.cr/acerca_del_senara/direcciones/direccion_de_investigacion_y_gestion_hidrica/Mapas_Vulnerabilidad.aspx

Silva, J., Estrada, F., Rodríguez, R., Ochoa, S., Villalpando, F., & Cruz, G. (2010). Vulnerabilidad Acuifera como Herramienta de política ambiental para la protección de manantiales en Michoacán, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26 (1). Consultado en: <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/20441/19380>

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (2004). *Applied Geophysics*. New York, USA: Press Syndicates of the University of Cambridge.

Torres, M., Basulto Y., Cortés, J., García, K., Koh, A., Puerto, F., y Pacheco, J. (2014). Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación del agua subterránea en Yucatán. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 1(3), 189-203. Recuperado el 05 de diciembre de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282014000300001&lng=es&tlng=es.

Tovar, M., & Rodríguez, R. (2004). Vulnerability assessment of aquifers in an urban-rural environment and territorial ordering in León, Mexico. *Geofísica Internacional*, 43 (4), 603-609. México. Consultado de [<https://www.redalyc.org/pdf/568/56843409.pdf>]

Urrutia, J., y Martín del Pozzo, A. (1993). Implicaciones de los datos paleomagnéticos sobre la edad de la Sierra de Chichinautzin, cuenca de México. *Geografía Internacional*, 32(3), 523-533.

Valcarce Ortega, R. M. (abril de 2016). Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de la Cuenca. *Ingeniería Hidráulica Ambiental*, XXXVII (1), 3-14.

Van Stempvoort, D., Ewert, L., & Wassenaar, L. (1993). Aquifer Vulnerability Index: A Gis Compatible Method for Groundwater Vulnerability Mapping. Consultado de Taylor & Francis / ISSN: 0701-1784 (Print) 1918-1817 (Online) Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/tcwr20>

Vargas (2010). Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Grupo de recursos hídricos. República de Colombia. Consultado en <https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/acuiferos/Propuesta-metodologica-Vulnerabilidad-Intrinseca-de-lo-Acuiferos-a-la-Contaminacion.pdf>

Vázquez-Sánchez, E., y Jaimes-Palomera, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. (U. I. Geofísica, Ed.) *Geofísica Internacional*, 28(2), 133-190.

Velázquez, A., Sánchez, J., Adame, S., Paredes, J., Mancino, M. (2017). Determinación de vulnerabilidad de acuíferos usando método SINTACS por aplicación de plaguicidas en suelos B orícolas en Villa Guerrero, Estado de México. *Revista Universitaria de Geografía*, 26(2), 111-129. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.

Vías Martínez, J. M. (2005). Desarrollo Metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del sur de España. Tesis Doctoral. Departamento de Geografía. Facultad de Filosofía y letras. Málaga, España: Universidad de Málaga.

Vlaicu, M., & Munteanu, C. (2008). Karst groundwaters vulnerability assessment methods. Recuperado el 2020, de <http://www.speotraavaux.iser.ro/08/art06.pdf>.

Vrba, J. (2003). The impact of aquifer intensive use on groundwater quality. En M. LLamas, & E. Custodio, *Intensive Use of Groundwater*. 113-132. Madrid: fundacionbotin.org.

Weber, J. F. (2014). Parameters of Horton's infiltration model obtained through the use of a rainfall simulator, Córdoba, Argentina. *Revista Ambiental del Agua*, On-line version ISSN 1980-993X.

3. ZONIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD PROTECTORA Y VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO DE TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO.

MA. DE LOURDES VÁZQUEZ CASTRO¹; L. RAYMUNDO REYES GUTIÉRREZ ²; MAURICIO CARRILLO GARCÍA ³; AURELIO REYES RAMÍREZ ³

¹ Estudiante de Doctorado en IAUJA, Universidad Autónoma Chapingo. Carr. México - Texcoco, Km 38.5. Chapingo, Estado de México. C.P. 56230. México. (+52) 595 952 1551. lourdesvc@msn.com

² Profesor investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Lerma. Av. De las Garzas No 10, Col. El Panteón, Lerma de Villada, Estado de México, C.P.52005 México. (+52) 728 282 7002. rareygu@gmail.com* (autor correspondiente).

³ Profesor investigador del departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Carr. México - Texcoco, Km 38.5. Chapingo, Estado de México. C.P. 56230. México. (+52) 595 952 1551.

3.1. Resumen.

El estudio consistió en estimar la capacidad protectora y vulnerabilidad intrínseca natural del acuífero de Texcoco constituido por materiales lacustres, aluviales y formaciones volcánicas, al oriente del Valle de México, mediante la combinación del método AVI y el parámetro geoeléctrico de Dar Zarrouk (Conductancia Longitudinal Unitaria, S). Se realizaron 87 sondeos eléctricos verticales Schlumberger (SEV) distribuidos en la zona del acuífero. Los datos de los SEV en campo se adquirieron con un resistivímetro Terrameter SAS-300B LS con abertura de electrodos de corriente de 750 m a ambos lados de un centro común y se interpretaron con el programa de computadora IX1D de Interpex. La conductancia longitudinal unitaria, se obtuvo a partir de la inversión de los datos de campo y se elaboraron mapas de contornos con el método kriging y de mínima curvatura en Surfer V16. El espesor de la capa superior, de la zona no saturada, es variable entre 0.3 y 10.5 m. La conductancia longitudinal de la capa superior presenta valores de 0.0 a 75 Siemens. El nivel del agua subterránea en el acuífero presenta una elevación de 2140 m en la zona centro sur y 2290 m en las estribaciones de la Sierra de Río Frío. Con el método AVI, a partir de los datos de la conductividad hidráulica, K_v ($m \cdot d^{-1}$) y el espesor h (m) de la zona no saturada, se obtuvieron valores de la resistencia hidráulica $C=1.4$ a 3.9 días. Los resultados obtenidos son de interés para las autoridades municipales en la planeación y toma de decisiones.

Palabras clave: conductancia longitudinal, Dar Zarrouk, estudio geoeléctrico, método AVI.

¹ Tesis de Doctorado en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor : Ma. de Lourdes Vázquez Castro

Director : Dr. Mauricio Carrillo García

ZONING OF PROTECTIVE CAPACITY AND VULNERABILITY TO CONTAMINATION OF THE TEXCOCO AQUIFER, STATE OF MEXICO

MA. DE LOURDES VÁZQUEZ CASTRO¹; L. RAYMUNDO REYES GUTIÉRREZ^{2*}; MAURICIO CARRILLO GARCÍA³; AURELIO REYES RAMÍREZ³

¹ IAUIA graduate student, Universidad Autónoma Chapingo. Carr. México - Texcoco, Km 38.5. Chapingo, State of Mexico. C.P. 56230. México. (+52) 595 952 1551. lourdesvc@msn.com.

^{2*} Research Professor. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Lerma Av. De las Garzas No 10, Col. El Panteón, Lerma de Villada, State of Mexico, C.P.52005 México. (+52) 728 282 7002. rareygu@gmail.com*. (Corresponding author)

³ Research professor of the Department of Irrigation, Universidad Autónoma Chapingo. Carr. México - Texcoco, Km 38.5. Chapingo, State of Mexico. C.P. 56230. México. (+52) 595 952 1551.

3.2. Abstract

This study consisted of estimating the protective capacity and natural intrinsic vulnerability of the Texcoco aquifer formed by lacustrine deposits, alluvial materials, and volcanic formations, east of the Valley of Mexico, by combining the AVI method and the Dar Zarrouk geoelectric parameter (Unitary Longitudinal Conductance, S). Eighty-seven (87), Schlumberger Vertical Electric Wells (VES's) were made and distributed in different profiles in the aquifer area. The VES data in the field were acquired with a Terrameter-LS resistivity meter with 750 m current electrode opening on both sides of a common center and interpreted with the Interpex IX1D computer program. The unit longitudinal conductance was obtained from the inversion of the field data and contour maps were elaborated with the kriging method and minimum curvature in Surfer V16. The thickness of the upper layer, of the unsaturated zone, is variable between 0.3 and 10.5 m. The longitudinal conductance of the upper layer presents values from 0.0 to 75 Siemens. The groundwater level in the aquifer presents an elevation of 2,140 m in the south-central zone of the study area to 2,290 m in the foothills of the Sierra de Río Frío. With the AVI method, from the data of the hydraulic conductivity, K_v ($m \cdot d^{-1}$), and the thickness h (m) of the unsaturated zone, values of the hydraulic resistance $C = 1.4$ to 3.9 days were obtained. The results obtained are of interest to the municipal authorities in planning and making decisions to preserve the underground water resource.

Keywords: protective capacity, geoelectric study, Dar Zarrouk, AVI method, vulnerability.

¹ Doctoral thesis, Postgraduate in Agricultural Engineering and Integrated Use of Water, Universidad Autónoma Chapingo.

Author : Ma. de Lourdes Vázquez Castro.

Advisor : Dr. Mauricio Carrillo García.

3.3. Introducción

El término de “vulnerabilidad” se define como la susceptibilidad de un acuífero a ser afectado por una carga contaminante aplicada en la superficie del terreno, determinada por las características intrínsecas de los estratos que constituyen la zona no saturada (Foster et al., 2007; Foster e Hirata, 1988).

Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca como el índice de Vulnerabilidad del Acuífero (AVI), permite identificar las zonas de riesgo a la contaminación de un acuífero (Foster e Hirata, 1988), así como, determinar las zonas protectoras del acuífero en estudio a partir de la conductividad hidráulica y el espesor de la zona no saturada.

En los estudios de protección contra la contaminación del agua subterránea existen diversos factores que contribuyen a la incertidumbre de los parámetros hidráulicos de los acuíferos, por ejemplo, el considerar el medio hidrogeológico como homogéneo e isotrópico (Auge, 2008; Orellana, 1982) por lo que, es indispensable determinar la complejidad del subsuelo para un sistema multicapa. A lo largo del tiempo se han aplicado diferentes técnicas geofísicas para este fin, sobresaliendo los métodos geoeléctricos por el fácil manejo e interpretación y bajo costo.

La aplicación de los métodos geoeléctricos como; el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV, arreglo Schlumberger) y actualmente la tomografía eléctrica resistiva (TER), al estudio de la capacidad protectora de los materiales de cobertura contra la contaminación del agua subterránea se han reportado en literatura (Benabdelouahab et al., 2018; Okonkwo y Ugwu, 2015; Oladapo y Akintorinwa, 2007; entre otros), donde se establecen parámetros hidráulicos del acuífero a partir de la resistividad aparente de las rocas y de los parámetros de Dar Zarrouk para proporcionar información y describir las zonas protectoras susceptibles a contaminarse por la acción natural y/o antropogénica.

El agua subterránea del acuífero de Texcoco es una fuente importante de suministro, que abastece al menos 13 municipios al oriente del Estado de México, presenta una explotación intensiva con una profundidad del nivel del agua para el 2011 que varía de 40 a 130 m, registrándose una tasa de abatimiento de 1.2 a 3.8 m·año⁻¹. Debido a la extracción constante de agua, se han presentado hundimientos diferenciales e incluso ha mermado el flujo de agua de los manantiales de la zona (DOF, 2019). Además, la existencia de focos de contaminación como; el basurero del Bordo Poniente, ubicado dentro de la zona federal del exlago de Texcoco, que se ha utilizado para el confinamiento de residuos sólidos urbanos y recientemente la ubicación de la planta de composta de residuos orgánicos, representan un problema latente de contaminación al acuífero.

El acuífero de Texcoco ha sido estudiado donde la gestión del agua ha estado orientada a la disponibilidad y explotación volumétrica de los recursos hídricos subterráneos, para el abastecimiento de la población, para la infraestructura, entre otros usos. Mientras que se ha dedicado poca atención a los estudios de protección y vulnerabilidad del acuífero. Estudios que comprenden una porción del acuífero de Texcoco (exlago de Texcoco) son los realizados en la Ciudad de México, como el estudio de vulnerabilidad acuífera realizado por Ramos-Leal (2010), en el cual identifica, con el método SINTAC, que la zona lacustre del acuífero de la zona Metropolitana del Valle de México, es el que presenta un menor rango de vulnerabilidad acuífera. Otro estudio relevante en la zona de la Ciudad de México es el reportado por Hernández-Espriú et al. (2014), en donde aplica el método denominado “DRASTIC-Sg”, que permite evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea en acuíferos urbanos afectados por el hundimiento diferencial causado por el bombeo intensivo.

Con respecto al acuífero de Texcoco, no se localizó información de algún mapa de riesgo a la contaminación o de vulnerabilidad acuífera. Por lo que el objetivo principal de este estudio es evaluar el nivel de protección y vulnerabilidad a la

contaminación en la zona que comprende el acuífero de Texcoco, enfocando el análisis en los sitios detectados como susceptibles de incorporar materiales naturales y/o antropogénicos, que impacten la calidad del agua subterránea mediante estudios de vulnerabilidad de acuíferos (AVI) y métodos geoeléctricos por el método Dar Zarrouk (Conductancia Eléctrica Unitaria, S), demostrando que es una técnica de fácil ejecución y que instituciones educativas de la región, pueden participar aportando información importante para finalmente implementarla en los planes de manejo a nivel regional.

La región del acuífero de Texcoco es una zona agrícola-ganadera-industrial, cuya fuente principal de abastecimiento, es la extracción de agua subterránea, lo que justifica la realización de estudios tendientes a conocer el grado de protección y vulnerabilidad que el sistema acuífero presenta ante fuentes de contaminación natural y/o antropogénica. Asunto apremiante para un manejo sustentable del agua subterránea, e identificar las áreas protectoras y vulnerables en beneficio de los usuarios del agua. En este trabajo de investigación se logra establecer, en la zona del acuífero de Texcoco, las zonas susceptibles a la infiltración, ya sea por la permeabilidad del material, fracturas y/o deslizamientos en la zona no saturada del acuífero.

Ubicación del área de estudio.

El área del acuífero de Texcoco se localiza en la zona nororiental del Valle de México y al oriente del Estado de México, entre los paralelos 495,000 y 54,0000 de latitud norte y los meridianos 2,130,000 y 2,175,000 de longitud oeste en coordenadas planas WGS84 UTM Z14, con una superficie de aproximada de 934 km² (Figura 24).

Este acuífero pertenece a la Región Hidrológica RH XIII y a la Cuenca del Valle de México. En el valle de Texcoco desembocan actualmente varios ríos intermitentes (Papalotla, Xalapango, Coxacoaco, Texcoco, Chapingo, San

Bernardino, Santa Mónica, Coatepec y San Francisco), los cuales desciende de las zonas altas de la Sierra Nevada, hasta la planicie del exlago de Texcoco. El acuífero de Texcoco se encuentra comunicado al oriente con el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, en la parte Norte con el acuífero Cuautitlán-Pachuca a través de los materiales aluviales y lacustres, comunes en estas planicies y hacia el sur con el acuífero Chalco-Amecameca (DOF, 2019).

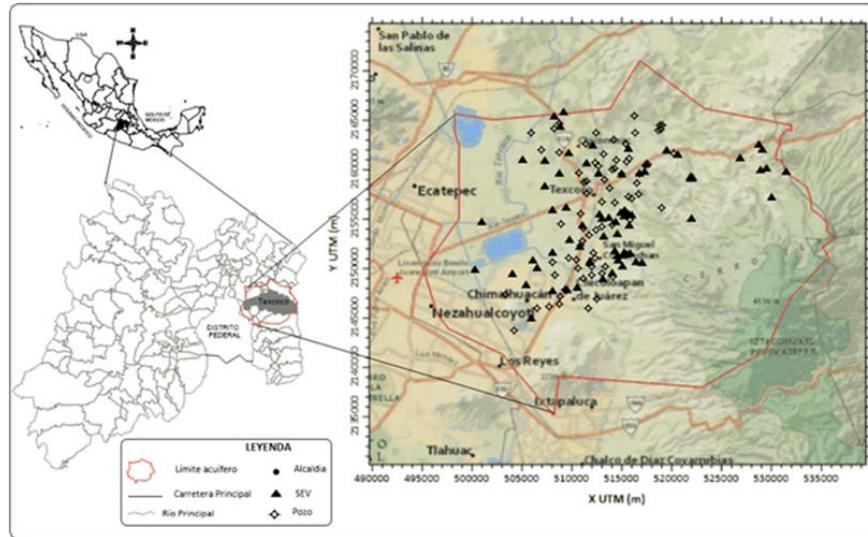


Figura 24. Localización del acuífero de Texcoco, indicando la ubicación de los SEV de prospección geoelectrónica y pozos de la zona de estudio.

Referente geológico.

El Valle de Texcoco pertenece a la provincia Fisiográfica denominada Eje Neovolcánico, caracterizado por presentar sierras volcánicas y cañadas entre los flujos de material ígneo, así como lomeríos de basalto y el vaso lacustre salino. En la porción oriente, sobresalen rocas ígneas como la andesita y el basalto, tobas y brechas volcánicas de la formación Tarango. En la región central se presentan rellenos aluviales y al poniente depósitos lacustres. En la zona se

distinguen diferentes formaciones geológicas (Figura 25), donde la permeabilidad está controlada por su granulometría, fracturamiento y grado de compactación.

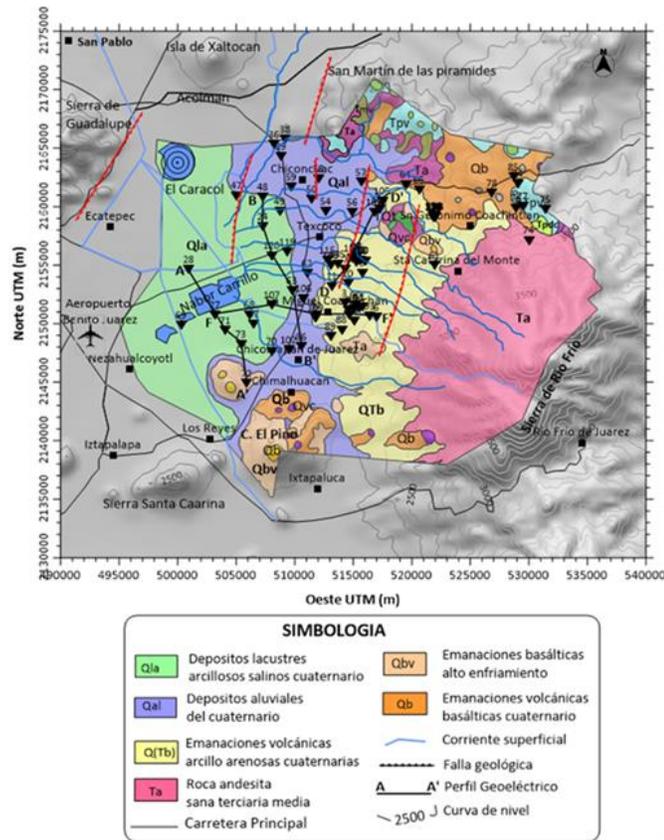


Figura 25. Esquema geológico del área de estudio mostrando ubicación de SEV's y perfiles geoelectricos (Modificado INEGI, 2017; Escobar-Villagrán y Palacios-Vélez, 2012).

Los materiales del vulcanismo de fines del terciario y durante el cuaternario; tobas basálticas (Qb), material brechoide, escoráceo (Qbv), emanaciones volcánicas arcillo arenosas (Qtb), abarcan desde el piedemonte de las sierras aledañas al oriente, teniendo contacto con la formación Tarango hasta las inmediaciones de lo que fue el Lago de Texcoco conformando estratos granulares diversos. Los depósitos lacustres (Qla), comprende sedimentos finos incluidos los estratos arenosos permeables, productos de la desintegración de rocas andesíticas que

lo rodean. Los Depósitos aluviales (Qal), constituidos por material clástico fluvial, poco consolidado se encuentran relleno el Valle. Por lo que, el material presente está formado de tamaño diverso como gravas, arenas limos y arcillas con variaciones laterales de importancia (CONAGUA, 2018b).

Debido a la heterogeneidad, que presenta la zona, en distancias relativamente cortas, es indispensable realizar investigaciones indirectas, con la finalidad de conocer la complejidad del subsuelo para el análisis hidrodinámico con vistas para la modelación del flujo y transporte de posibles contaminantes que puedan ingresar a través del medio poroso. Es por ello, que los métodos de resistividad eléctrica son utilizados con mayor frecuencia, en estudios de prospección geofísica aplicados a la investigación del agua subterránea (López-Loera, 2014; Ugwu et al., 2016).

3.4. Materiales y Métodos

Para el desarrollo de este trabajo, se realizó investigación bibliográfica de diferentes fuentes y archivos proporcionados por la Subdirección General técnica de CONAGUA (2018), INEGI (2001, 2014, 2017) y estudios técnicos de geofísica eléctrica, realizados en el área de hidrogeología del departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma de Chapingo. Esta información fue corroborada y completada, por estudios geoelectrónicos, análisis físicos y químicos, aplicados en las zonas detectadas como susceptibles de presentar permeabilidad o infiltración que pueda afectar a zonas suprayacentes del acuífero. Las zonas permeables por uso de suelo son una guía para correlacionar la información obtenida de los estudios geoelectrónicos, realizados en campo, así mismo la geología de la zona de estudio con base a cartas geológicas y topográficas 1:50000 de INEGI (2001, 2017).

En total, se realizaron 87 Sondeos eléctrico-verticales (SEVs) en el área de estudio usando el arreglo tetraelectrónico Schlumberger con una semi abertura máxima de electrodos de corriente de 750 m usando un Georesistivímetro Terrameter y sus accesorios. El método consiste en inyectar corriente eléctrica al terreno a través de un par de electrodos A, B para medir la respuesta de los materiales del subsuelo al flujo de corriente en otro par de electrodos M, N, donde la distancia entre electrodos cumpla la proporción de $AB/2 \geq 5(MN/2)$ (Koefoed, 1979; Orellana, 1982). La ventaja del arreglo Schlumberger asegura que éste minimiza la variación lateral de cambios en la geología, así como el efecto superficial y aumenta la profundidad de penetración de la corriente.

Para el arreglo Schlumberger utilizado en este estudio, se obtuvieron las lecturas de la resistencia R (de la ley de Ohm, $R = \frac{\Delta V}{I}$), del volumen del material geológico dentro del espacio eléctrico de la configuración electródica. Del producto del factor geométrico K y R, se obtuvo la resistividad aparente ρ_a , para cada una de las capas litológicas detectadas, utilizando las ecuaciones (1) y (2).

$$\rho_a = K \left(\frac{\Delta V}{I} \right) = KR \quad (1)$$

$$K = \pi \left[\frac{\left(\frac{AB}{2} \right)^2 \left(\frac{MN}{2} \right)^2}{MN} \right] \quad (2)$$

Además, se realizó un recorrido de la zona de estudio para la toma de muestra de suelo, logrando recolectar 120 muestras en el área que comprende el acuífero, las cuales fueron analizadas con base a la NOM 021-SEMARNAT-2000, en sus apartados AS-01, AS-02, AS-03 y AS-09, con el propósito de clasificación del suelo. Se realizaron también mediciones de conductividad hidráulica saturada de campo (K_v), en la zona no saturada del acuífero, utilizando un infiltrómetro de doble cilindro para estimar este parámetro.

La importancia de determinar parámetros como K_v (Reynolds y Elrick, 1986; Stephens, 2019), mediante estudios de suelo *in situ*, permiten describir y evaluar los procesos de infiltración y la dinámica del movimiento del agua en la zona no saturada (ZNS) del acuífero y por consecuencia, si el material lo permite, llegar al acuífero como recarga, alterando las propiedades de la calidad del agua subterránea. Para la secuencia de n capas sedimentarias horizontales, las propiedades eléctricas pueden representarse en términos de la resistividad eléctrica ρ_i y su espesor h_i de cada capa. El flujo de agua y de corriente eléctrica depende del tipo (tamaño del grano) y espesor de las capas, de modo que las conductividades hidráulicas y eléctricas son mayores en la dirección horizontal que en la vertical, dando lugar a una unidad litoestratigráfica heterogénea y anisotrópica. Por tanto, para identificar las zonas permeables/impermeables, así como el material geológico propicio para albergar agua en sus poros, se puede evaluar la protección y el riesgo de que algún material contaminante ingrese al subsuelo mediante el método AVI y los parámetros de Dar Zarrouk (DZ) como la Conductancia Longitudinal (S) y la Resistencia Transversal (RT) definidos por Maillet (1947).

Para este estudio, la caracterización de la capacidad protectora del acuífero se basa en los valores de la Conductancia Longitudinal Unitaria (S), ecuación (3) de las unidades de roca de cobertura o zona vadosa en el área de estudio.

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} = \sum_{i=1}^n h_i \times \sigma_i \text{ (mhos o Siems)} \quad (3)$$

Donde h_i (m) es el espesor de la capa “ i ” y ρ_i (Ohm-m) es la resistividad de la capa “ i ”, σ_i (siemens) la conductividad eléctrica de la capa “ i ” y (n) es el número de capas desde la superficie hasta la profundidad del nivel de agua.

La capacidad protectora de un acuífero es la capacidad de la capa superficial o de cobertura de impedir la filtración de fluidos o lixiviados desde la superficie del

terreno hacia el acuífero subyacente, su caracterización se basa en los valores de la conductancia longitudinal unitaria (S), un parámetro de segundo orden llamado de Dar Zarrouk, clasificado conforme al Cuadro 4.

Cuadro 4. Índice de la conductancia longitudinal (capacidad protectora). (Fuente: Oladapo y Akintorinwa, 2007).

S (mhos)	Índice de la Capacidad protectora
>10	Excelente
5-10	Muy buena
0.7-4.5	Buena
0.2-0.69	Moderada
0.1-0.19	Débil
< 0.1	Pobre

Con respecto a la evaluación de la capacidad protectora de la cobertura con AVI (Aquifer Vulnerability Index), se aplica un procedimiento que determina la vulnerabilidad del acuífero con ayuda del parámetro denominado Resistencia Hidráulica (C), el cual se determina con la ecuación (4). La Resistencia Hidráulica estima el tiempo que tarda un contaminante en atravesar la zona no saturada hasta llegar al nivel freático. Esta metodología, parte del supuesto de que el compuesto contaminante viaja en dirección vertical, sus unidades se expresan en días o años.

$$H_R = C = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{K_i} \quad (4)$$

Donde C es un factor teórico que describe la resistencia de un material geológico al flujo vertical, es una propiedad de una capa semipermeable (Prashant et al., 2020), d_i (m) corresponde al espesor de las capas homogéneas de la zona no saturada, mientras que K_i ($m \cdot día^{-1}$) es la conductividad hidráulica asociada al

suelo. A partir de los valores del tiempo de viaje se estima la vulnerabilidad del acuífero según lo indicado en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Vulnerabilidad del Acuífero según el Método AVI. (Fuente: Prashant et al., 2020).

Resistencia Hidráulica C	Log (C)	Vulnerabilidad
< 10	< 1	Extremadamente Alta
10-100	1 a 2	Muy Alta
100-1000	2 a 3	Moderadamente Alta
1000-10000	3 a 4	Baja
>10000	> 4	Extremadamente Baja

Evaluación de la capacidad protectora del acuífero

Colección de datos

Los datos recolectados de los estudios geoelectricos (SEV), permitieron evaluar la capacidad protectora y vulnerabilidad en la zona del acuífero de Texcoco y sus inmediaciones. Se construyeron perfiles cubriendo distancias en la parte centro del área de estudio, de entre 1,300 m y 12,000 m de distancia. Los datos de resistividad geoelectrica con SEV se obtuvieron con un Georesistivimetro Terrameter SAS-300 de ABEM con dispositivo tetraelectrónico y separación eléctrica de 2 a 76 m en los electrodos de potencia y de 10 a 750 m con los electrodos de corriente.

Las estaciones de los SEV's se distribuyeron en las fronteras norte, noreste, noroeste, centro y sur de la zona en estudio. La parte oeste no se cubrió en su totalidad, debido a restricciones de acceso por la construcción y maquinaria almacenada del nuevo aeropuerto internacional de la ciudad de México (AICM). Los datos se procesaron con el software IX1D (programas de cómputo de

interpretación de imágenes de resistividad 1D Interpex, 2010) y Surfer V16 (Golden Software).

A partir de los datos interpretados se generaron secciones geoelectricas para delinear las capas suprayacentes al acuífero. Los parámetros de las capas obtenidas se utilizaron para calcular las variaciones de la conductancia longitudinal (S) y la resistencia transversal (R_T), conocidos como parámetros de Dar Zarrouk (Orellana, 1982). Estos parámetros representan la descomposición de la circulación de corriente en la dirección vertical y horizontal, sin grandes variaciones, al considerar un medio equivalente (isótropo y homogéneo).

La combinación de la resistividad y de los espesores con los parámetros de Dar Zarrouk, Conductancia Longitudinal Unitaria (S), Resistencia Transversal Unitaria (R_T), la resistividad longitudinal (ρ_S) y la resistividad transversal (ρ_T), se utilizaron directamente para evaluar la capacidad protectora (vulnerabilidad) del acuífero.

Procesamiento de datos e interpretación

Los datos de resistividad eléctrica medidos en campo se procesaron graficando los valores de la resistividad aparente (ρ_a) contra la separación eléctrica ($AB/2$) para obtener las curvas de SEV y se realizó una interpretación cuantitativa de los datos, para obtener una caracterización aproximada del modelo del subsuelo.

El procesado de los datos se realiza introduciendo los valores de resistividad aparente en el programa de inversión (IX1D), La inversión de cada SEV genera como resultado un modelo de capas de resistividades y profundidades reales que es la información que ha de interpretarse y correlacionarse con la posible unidad hidroestratigráfica, con el fin de cuantificar y delimitar las anomalías geológicas en profundidad y obtener una visión de la estructura y material del subsuelo.

La información recolectada de la infiltración y conductividad hidráulica saturada de campo, textura e infiltración son datos iniciales de importancia para incorporar

en los modelos numéricos que describen el comportamiento del agua subterránea en un acuífero multicapa y en la remediación de un acuífero contaminado.

3.5. Resultados y Discusión

El acuífero de Texcoco se considera un acuífero semiconfinado, en los cortes de los estudios geoelectrónicos realizados en la zona de estudio, se detecta una capa de arcilla que funciona como un acuitardo, extendiéndose el espesor de este hacia la parte oeste del acuífero, y adelgazándose hacia el este, donde se presentan rocas ígneas de permeabilidad media. El material que conforma la primera capa del suelo es detonante para que algún contaminante logre o no infiltrarse a la zona no saturada y posteriormente afecte la calidad del agua subterránea.

Se elaboró el mapa potenciométrico y la evolución del nivel del agua con el método de interpolación kriging en Surfer V16, (Figura 26 y 27). En el caso de las cargas potenciométricas se establecieron entre 2,140 y 2,290 msnm; la superficie piezométrica presenta una serie de conos de abatimiento ubicados en Chicoloapan, Texcoco y en las inmediaciones de Chimalhuacán, con una evolución del nivel del agua de 0.2 a 1.8 m/año.

Existen diferentes factores que propician la infiltración de compuestos solubles logrando transportarlos por el flujo de agua subterránea, tales como; porosidad, textura del suelo, permeabilidad, y pH. La porosidad y la textura son variables que indican la cantidad de agua de recarga que puede retener la zona no saturada del acuífero, dependiendo de sus características y la topografía de la zona, mientras que el pH propicia la solubilidad de compuestos permitiendo un transporte hacia las zonas de menor carga hidráulica, logrando llegar a deteriorar la calidad del agua subterránea.

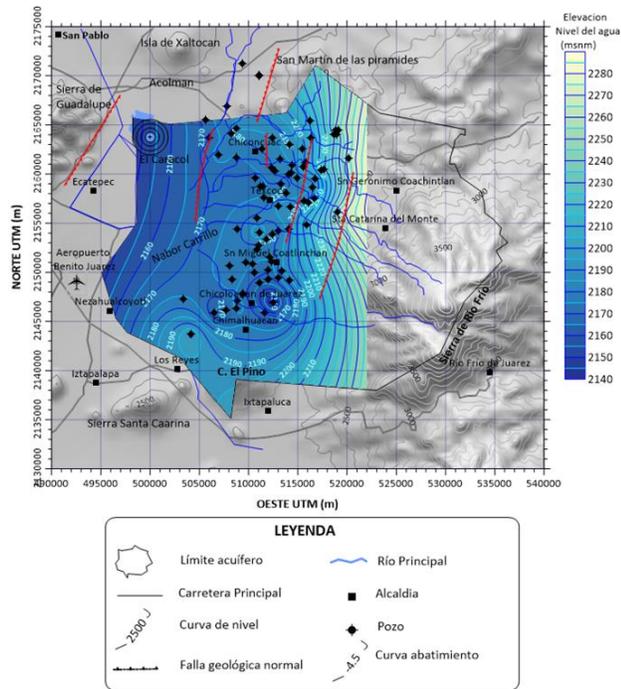


Figura 26. Mapa potenciométrico para 2017 (msnm).

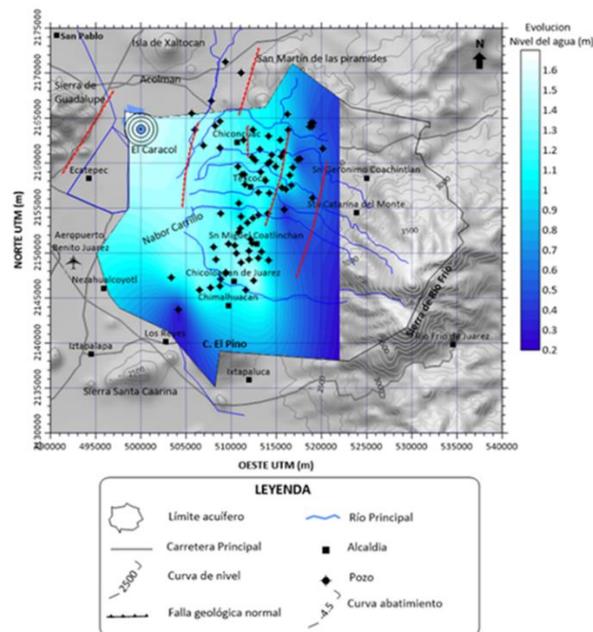


Figura 27. Evolución del nivel piezométrico para 2017-2018 (m).

De los análisis fisicoquímicos realizados en las muestras de suelo, aplicando la NOM 021-SEMARNAT-2000, se obtuvieron; con respecto a su pH (AS-02), tres clasificaciones en el suelo de la zona; suelo moderadamente ácido (40.62%), suelo neutro (25%) y medianamente alcalino (34.38%), del total de muestras, teniendo así un mayor porcentaje en medianamente ácidos debido a algunos constituyentes orgánicos e inorgánicos que pueda contener el suelo estudiado. Con respecto a la densidad aparente del suelo (AS-03), de los sitios muestreados se identificaron entre los valores de 1.21-1.32 g·cm⁻³, estos valores probablemente se deben a que las muestras se recolectaron en sitios influenciados por alto intemperismo y metamorfismo del material volcánico, clasificándose, según la NOM 021-SEMARNAT-2000 como un suelo de tipo franco, por probable presencia de material limoso y la retención de humedad de las arcillas.

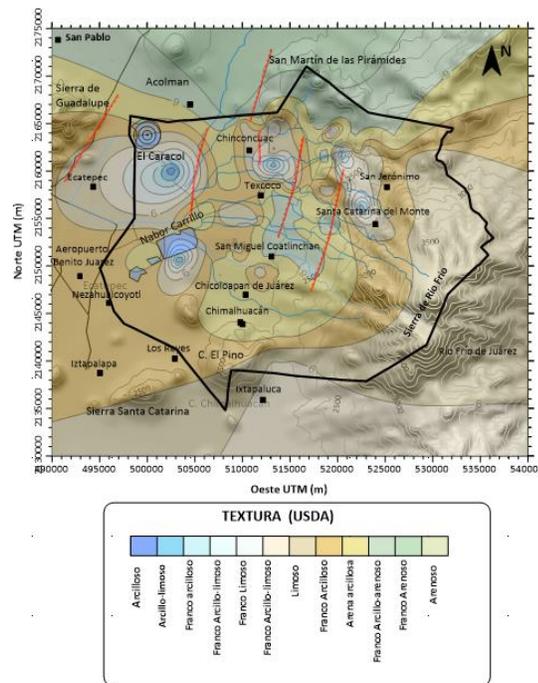


Figura 28. Clasificación de suelo por textura, zona del acuífero de Texcoco.

Las muestras presentan diferentes tipos de texturas (AS-09) de las cuales predominan: franco arenoso con 47.7 %, francos 19.5 %, franco arcilloso-arenosa 14.1 %, Franco arcillosa 6.3%, arena franca 6.3%, arcillosa 3.1%, franco limoso y arcillo limosa con 1.5% cada uno, por lo que predomina en el total de muestras, los suelos de tipo franco (Figura 28).

La interpretación de los resultados obtenidos de la tasa de infiltración de los sitios muestreados, se graficaron con el programa Surfer V16 (Figura 29), delimitando la zona de estudio de acuerdo con el tipo de material (consolidado, no consolidado). Para los análisis, se abarca la zona norte, central y oriente del acuífero, zonas importantes para recibir recarga y delimitar zonas de riesgo. Los suelos en la zona de Texcoco, por el porcentaje de arcilla presente no permiten que la filtración sea rápida, pero la presencia de arenas en la mayoría de los sitios estudiados adjudica una infiltración que favorece el abastecimiento del acuífero de Texcoco. No obstante, es importante detectar a tiempo si el suelo conduce algún fluido que pueda contaminar el agua del acuífero.

En el terreno estudiado predomina con mayor porcentaje un tipo de suelo de moderado a lento respecto a su velocidad de infiltración, lo que significa que presenta cierta compactación con una alta retención de agua en la superficie del suelo que no permite una filtración más rápida que la que teóricamente debería presentar, debido a la textura predominante (Franco arenosa).

En los límites de la zona poniente del acuífero se determinó una velocidad de infiltración muy lenta ($0.059 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$), que explica que la zona puede contener material compacto dentro del estrato de suelo (arcilla y limo). En la zona centro y oriente, se identificaron zonas con velocidades de infiltración de 1 a $6 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$, mientras que la zona norte del acuífero presenta la mayor tasa de infiltración con velocidades dese 7.0 hasta $11.2 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$. En la figura 29, se muestran los resultados de la conductividad hidráulica saturada de campo (K_v). Cabe mencionar, que se

realizaron todos los análisis *in-situ*, relacionando la velocidad de infiltración, al saturarse el suelo.

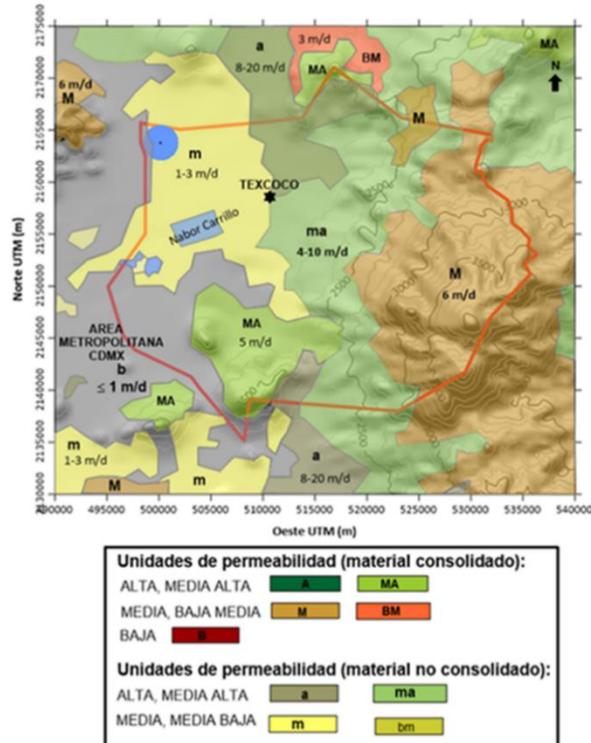


Figura 29. Mapa de zonas permeables en el acuífero de Texcoco, Estado de México.

Las zonas con mayor susceptibilidad a la infiltración de algún contaminante al acuífero son las que presentaron valores de K_v por arriba de $5 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ y corresponden a la parte central y hacia el norte del acuífero, las zonas con menor riesgo a infiltración de contaminantes son las detectadas en la zona poniente con rumbo a la ciudad de México, en la zona federal del exlago de Texcoco y zonas puntuales en el centro de Texcoco.

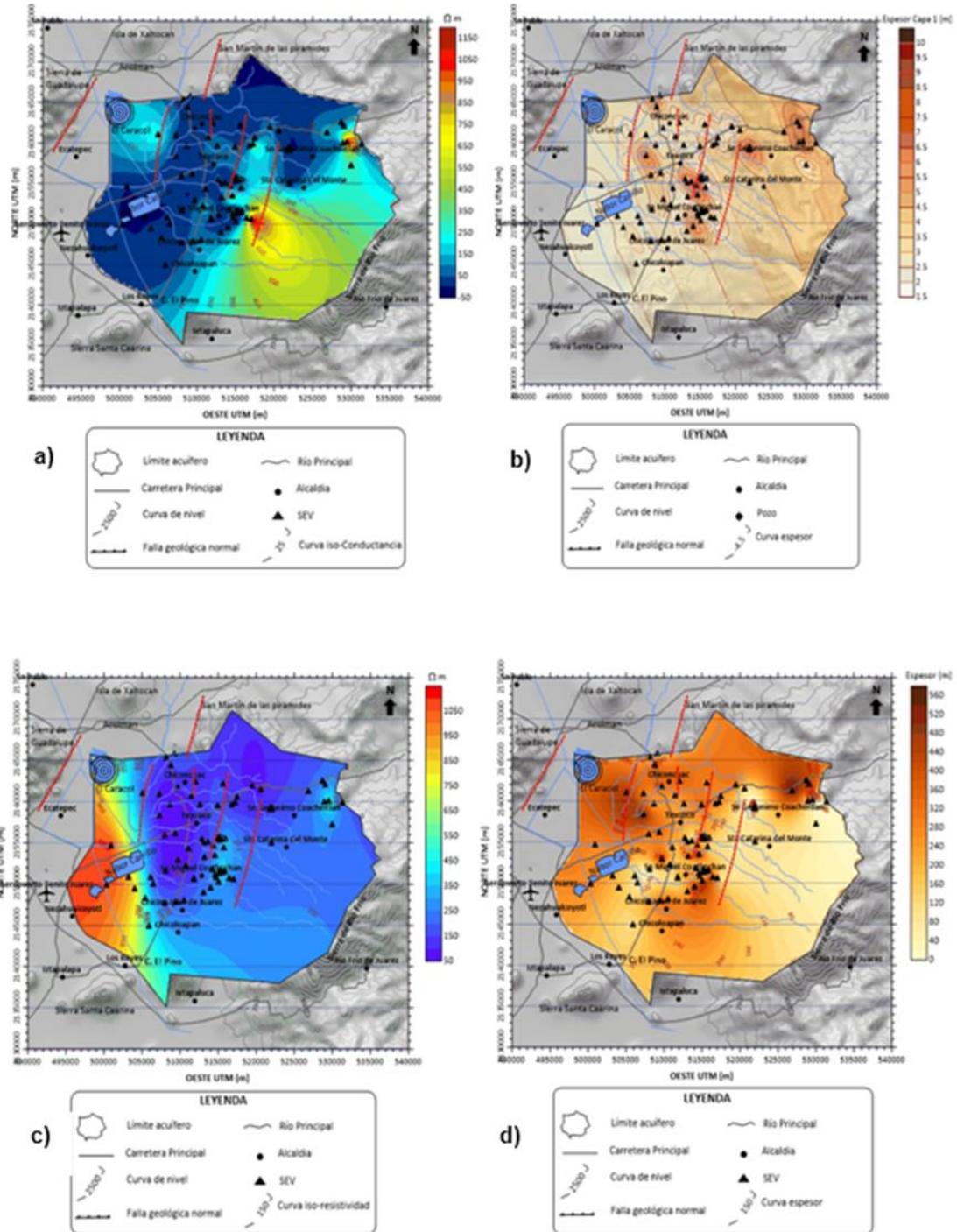


Figura 30. Distribución de la resistividad y espesores: a) Resistividad de la capa superficial, b) Espesor de la capa superficial, c) Resistividad de la capa base del acuífero, d) Espesor de la capa base del acuífero.

Los resultados de valores de resistividad y espesor de las capas detectadas con el método geoelectrico, en el proceso de inversión de datos, permitió obtener información de la litología del subsuelo y el espesor de la cobertura (Figura 30 a y b). La zona poniente presenta resistividades con valores bajos (0 a 10 ohm-m), mientras que la zona centro, norte y hacia el este del acuífero presenta variaciones en resistividad aparente que oscilan entre 50 a 150 ohm-m, de la zona centro con dirección hacia el sureste se localizaron los valores de resistividad mayores (650 a 1150 ohm-m). Mientras que la cobertura de la capa superior del suelo (Figura 30 b) presenta el menor espesor en la zona lacustre del exlago de Texcoco, incrementándose (8.5 – 9.5 m), en algunas zonas puntuales del centro (Texcoco) y en dirección hacia San Jerónimo Amanalco.

Con ayuda de los estudios geoelectricos resistivos, se localizó la capa base del acuífero (Figura 30 c y d). Identificando espesores prácticamente nulos al noreste del acuífero, incrementando su profundidad hasta localizar la base del acuífero, a una profundidad promedio de 120 m, y resistividades aparentes de 50 a 250 ohm-m, lo que indica que son zonas con capacidad de almacenar agua y apropiados en la recarga del acuífero, además de ser adecuadas para la extracción de agua potable. En la zona centro y con dirección noroeste se localiza la base del acuífero a una mayor profundidad, con dirección hacia la zona conocida como el Caracol.

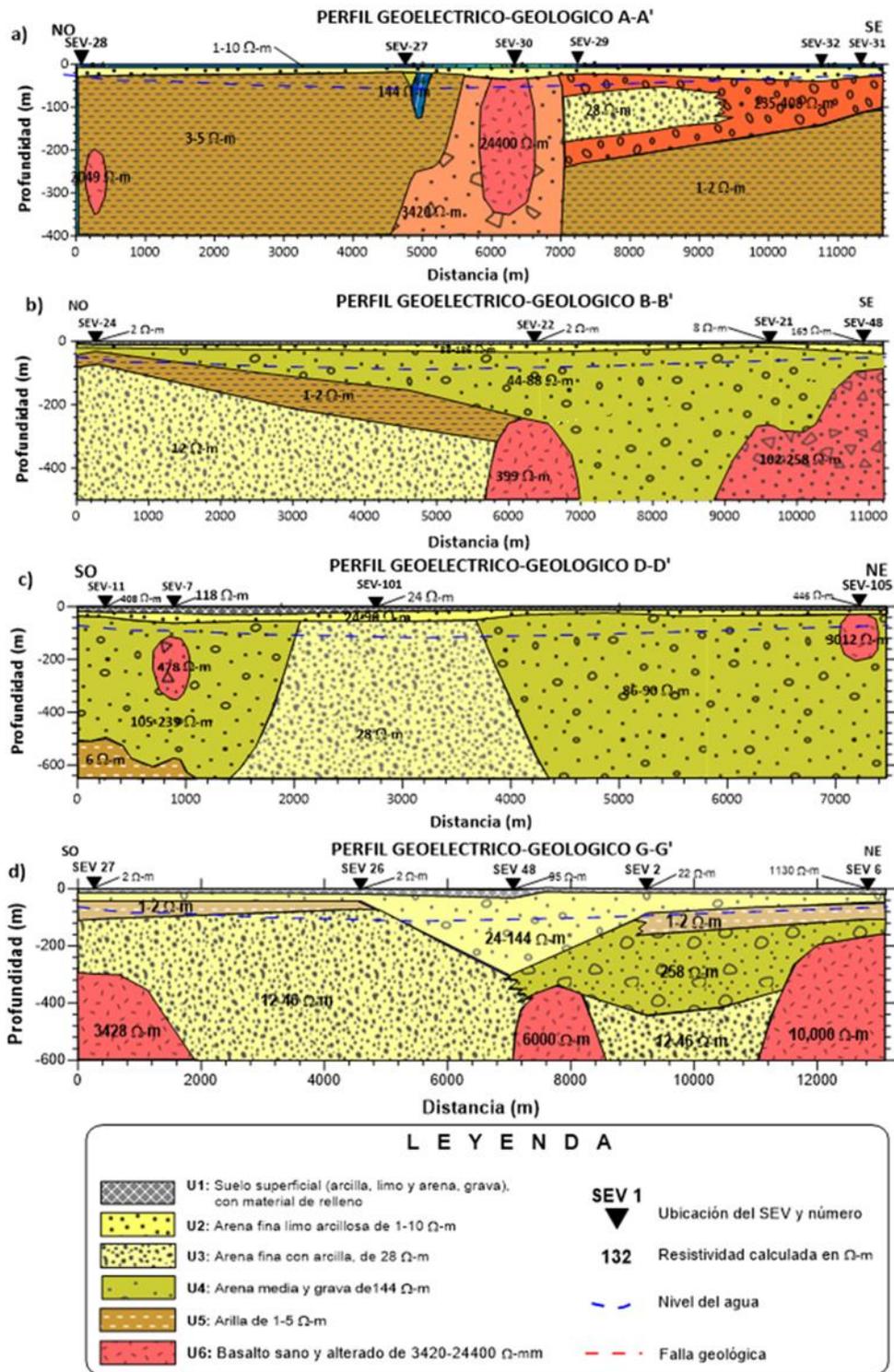


Figura 31. Perfiles geolétricos de la zona del acuífero de Texcoco.

En el perfil geológico-geoeléctrico A-A' (Figura 31 a), a una profundidad mayor de la capa superficial (> 30 m), se localiza el material arcilloso, propio de la zona lacustre, presentando su mayor espesor, con dirección noroeste entre los SEV 28 y 27. También, en este perfil se localiza a una profundidad de aproximadamente 40 m, en la zona centro en el SEV 30, una zona con resistividad de 2,400 a 3,420 ohm-m, correlacionado con material de tipo basalto fracturado a sano, que forma una zona impermeable. Con dirección al sureste, se localiza material de tipo arenoso (arenas gruesas gravas), que envuelve una zona puntual de arenas finas en una matriz de arcilla (28 ohm-m). El material tipo arenoso se asienta sobre un estrato de limos y arcillas (a la profundidad de estudio de este perfil), en dirección sureste.

En la zona centro del acuífero se obtuvo el perfil geológico-geoeléctrico B-B' (Figura 31 b), en dirección noroeste-sureste, detectándose una capa superficial con profundidad no mayor a 5 m con resistividades de 2 a 8 ohm-m (material compactado), a lo largo del perfil. Le subyace un estrato de material con resistividad aparente de entre 44 a 88 ohm-m, característico de materiales con capacidad de almacenar agua, con espesor variable, adelgazándose hacia los extremos, mientras que aumenta (su espesor), hacia el centro. Subyacente a este estrato, entre el SEV 24 y 22, una capa de arcilla con resistividad de 1 a 2 ohm-m, subyacida por material arcilloso con resistividad de 12 ohm-m de espesor variable, de 300 a 200 m de profundidad, mientras que al centro y sureste se presenta material fracturado en una matriz de arenas medias a gruesas o brecha (102 a 399 ohm-m), en dos zonas; una en el SEV 22 y otra entre los SEV 21 y 48 hacia el sureste.

Se localiza material tipo arenoso, a lo largo del perfil geoeléctrico D-D' (Figura 31 c), en el centro del perfil desde la superficie hasta la profundidad de estudio se localiza un estrato de arenas empacadas con material arcilloso (24 a 28 ohm-m), en los extremos del perfil de estudios en dirección suroeste y noreste, se identifica material arenoso de granulometría media a fina y presencia de material grueso

(gravas) (86 a 230 ohm-m), con buena capacidad de contener agua. En la zona inferior, del perfil de estudio, con dirección suroeste, se localiza material arcilloso (6 ohm-m). Y dos zonas puntuales en los extremos medios del perfil con presencia de material poco fracturado.

En el perfil geológico-geoeléctrico G-G' (Figura 31 d), con dirección ligera de suroeste a noreste, abarcando comunidades tales como; Chimalhuacán, Montecillos, San Miguel Coatlinchán, Chiconcuac y con dirección al Monte Tláloc, se identificó, en la capa superficial material fino tipo arcilla en dirección suroeste (Chimalhuacán), con resistividades que varían desde 2 a 22 ohm-m. En la zona noreste se determinaron resistividades de hasta 1130 ohm-m, en algunas zonas puntuales del perfil (la capa superficial), por la presencia de material rocoso poco fracturado, con dirección al monte Tláloc (zona de Río frío).

La variabilidad es debido al tipo y uso de suelo, este perfil abarca zonas; tipo lacustre y aluvial, del acuífero. Con dirección al suroeste se localizó un estrato de arenas finas, limo y arcilla a una profundidad de 40 a 120 m, mientras este mismo estrato se encontró también, con dirección al noreste con espesor promedio de 50 m, profundizando ligeramente en la zona centro, de 40 a 180 m. Se localizó material de granulometría media en una matriz de arcillas y limos en el centro y suroeste del perfil (12 a 46 ohm-m) y a la profundidad de estudio en dirección noreste. Se localizan zonas puntuales al noroeste, centro y sureste, materiales con resistividades elevadas (3400 a 10000 ohm-m), posible presencia de basalto no alterado.

La combinación de la resistividad aparente, conductividad hidráulica y el espesor de los materiales identificados se utilizaron directamente para evaluar la capacidad protectora (vulnerabilidad) del acuífero. Los resultados de la conductancia longitudinal unitaria (S), parámetro de Dar Zarrouk y la capacidad protectora (C), se muestran en la Figura 32, delimitados a diferentes intervalos. Se utiliza el programa Surfer V16, para graficar los resultados obtenidos y se

aplica una malla de 100 m de tamaño, en el sistema UTM utilizando la técnica de curvatura mínima para evitar oscilaciones bruscas y falsos máximos y mínimos locales.

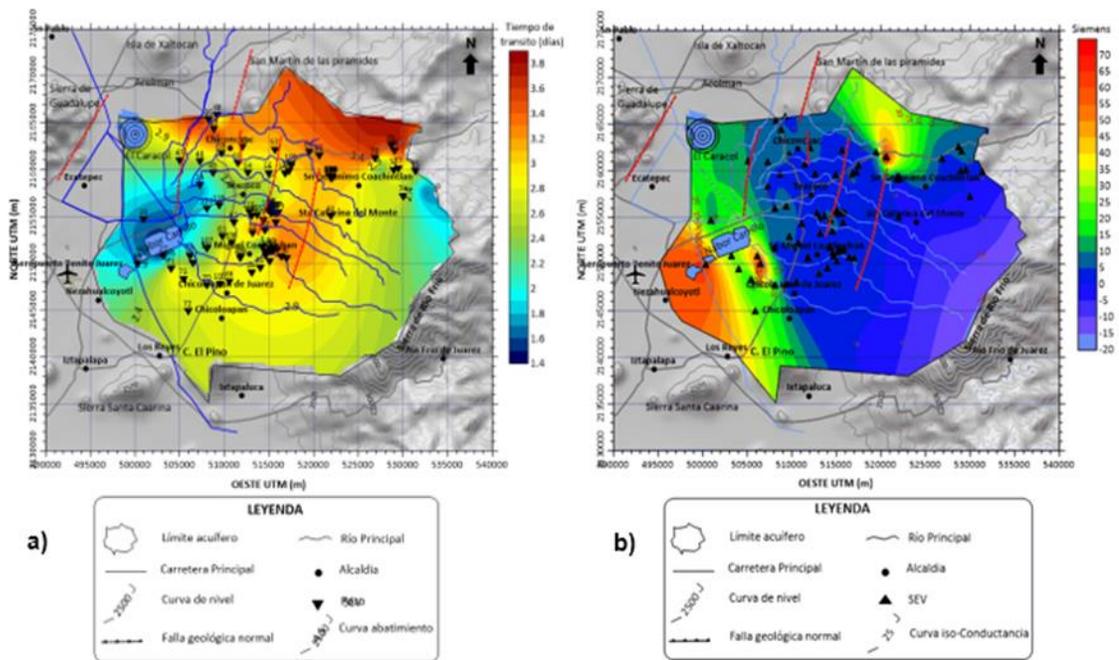


Figura 32. a) Distribución de la resistencia hidráulica (C , $m \cdot d^{-1}$). b) Distribución de la conductancia longitudinal unitaria (S , mhos).

La Distribución de los valores de resistencia hidráulica (C), representan el tiempo de viaje del agua infiltrada, para que se mueva verticalmente a través del medio poroso desde la superficie, debido a fenómeno de dispersión que involucra cambios de velocidad. El uso de este parámetro permite evaluar, la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación (Figura 32 a). En algunas zonas puntuales de la zona centro y Norte del acuífero, se localizaron valores máximos de C (3.2 a 3.9 días), sugiriendo una vulnerabilidad baja, para una infiltración vertical. En los extremos de la zona oeste y este se localizaron las zonas con un tiempo de transito menor (1.4 a 2 días), clasificándose con una vulnerabilidad muy alta.

Mientras que la mayor parte de la zona centro del acuífero presenta valores entre 2.1 a 3.0 días, considerándose de vulnerabilidad moderadamente alta.

Con respecto a la variación de la conductancia longitudinal unitaria (S), (Figura 32 b). Se identificaron áreas, con capacidad protectora al oeste, (extendiéndose de norte a sur) y una zona puntual en el noreste, con valores mayores a 10 Siemens, lo que indica una muy buena capacidad protectora. Mientras que la zona centro, este y sureste del acuífero presenta capacidad protectora débil (0.1 a 0.19 Siemens), y pobre (<0.1 Siemens).

3.6. Conclusiones

Los datos de los estudios geoelectrónicos y de infiltración realizados e interpretados se utilizaron para calcular la conductancia longitudinal unitaria, S, y el tiempo de arribo C, con los que se elaboraron mapas de la capacidad protectora de la cobertura del suelo contra la posible infiltración de fluidos o lixiviados hacia el acuífero y de vulnerabilidad, indicando que la zona de estudio presenta, en la mayoría de su superficie, vulnerabilidad de alta a moderadamente alta.

La capacidad protectora que presenta el acuífero, de acuerdo al parámetro de conductancia longitudinal (S), presenta variabilidad, esto se debe a que el acuífero es considerado de tipo semiconfinado, con zonas de hasta 40 m de arcilla, lo cual le confiere protección a infiltraciones. Sin embargo, se detectaron zonas específicas con capacidad protectora pobre, en la zona Este (roca ígnea fracturada tipo basalto) a débil (material areno gravoso), en la zona sureste, con dirección al centro del acuífero, mientras que se identifica una capacidad protectora moderada, en la zona centro y cubriendo la mayor parte del acuífero.

Con la información del espesor de las capas de la zona no saturada, del nivel del agua y los valores de la conductividad hidráulica de cada capa, se elaboró el mapa AVI (días), indicando que el área de estudio presenta, en general una vulnerabilidad de moderadamente alta a muy alta. Y aunque la zona lacustre

alrededor del lago Nabor Carrillo, presenta una cobertura superficial arcillosa (con un menor tiempo de tránsito), la presencia de una falla estructural permite el paso de infiltraciones. Los estudios realizados aplicando técnicas físicas, y geoeléctricas, permitieron identificar la zona Este y Sureste del acuífero como; zonas de pobre a débil capacidad protectora con alta a moderadamente alta vulnerabilidad a la infiltración vertical, así como con un tiempo de tránsito (C) que lo clasifica con grado de vulnerabilidad de alta a moderadamente alta, localizando igualmente la zona oriente como una zona con vulnerabilidad intrínseca moderadamente alta para incorporar contaminantes al acuífero.

Es relevante aplicar otros métodos de valoración (GOD, DRASTIC, SINTACS), para comparar los distintos grados del riesgo que presenta el acuífero de Texcoco a la contaminación, debido a que, al ser considerado un acuífero multicapa, presenta variaciones en la determinación de sus parámetros hidráulicos. De esta manera se logrará generar una herramienta para la planificación de actividades socioeconómicas y el ordenamiento territorial, con la finalidad de desarrollar políticas de gestión y protección del acuífero para prevenir la contaminación del agua subterránea y así lograr el aprovechamiento adecuado del acuífero.

3.7. Literatura Citada

Auge M. (2004). Vulnerabilidad de acuíferos. Revista Latinoamericana de Hidrogeología, 4, 85-103 [en línea]. <http://tierra.rediris.es> 02/04/2020.

Auge M. (2008). Hidrología Ambiental. Buenos Aires. Consultado en [Tierra.rediris.es](http://tierra.rediris.es) [en línea] <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/HidroGeoAmb.pdf> 05/04/2020.

Benabdelouahabad S., Salhib A., Himi M., El Messar JE., Casas A., Mesmoudie H., Benabdefadel A. (2018). Using resistivity methods to characterize the geometry and assess groundwater vulnerability of a Moroccan coastal aquifer. Groundwater for Sustainable Development 7, 293-304. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.07.004>

CONAGUA. (2018). Subdirección General Técnica. Archivos proporcionados de la base de datos de la Comisión Nacional del Agua CD-ROM.

CONAGUA. Subdirección General Técnica. (2018b). Acuíferos por Región hidrológico-administrativa. Obtenido de Sistema Nacional de Información del Agua. Consultado en <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuíferos> 10/05/2020.

DOF. Diario Oficial de la Federación. (2019). Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Texcoco, clave 1507, en el Estado de México, Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. Ciudad de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT. 13 septiembre 2019.

Escobar-Villagrán B., y Palacios-Vélez O. (2012). Análisis de la sobreexplotación del acuífero Texcoco, México. *Tecnología y Ciencias del agua* 3(2) 67-84.

Foster S., e Hirata R. (1988). Groundwater pollution risk assessment: methodology using available data. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima Perú, 81 pp.

Foster S., Hirata R., Gomes D., D'Elia M., y Paris, M. (2007). Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Utilities, Municipal Authorities, and Environment Agencies (also in Spanish & Portuguese). 2da. Ed. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, 103 pp [en línea]. Obtenido de The Word Bank: <https://www.researchgate.net/publication/280493781>

Hernández-Espriú A., Reyna-Gutiérrez J., Sánchez-León E., Cabral-Cano E., Carrera-Hernández J., Martínez-Santos P., Colombo, D. (2014). The DRASTIC-Sg model: An extension to the DRASTIC approach for mapping groundwater vulnerability in aquifers subject to differential land subsidence, with application to Mexico City. *Hydrogeology Journal* 22(6), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1130-4>

INEGI. Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2001). Cartas geológicas de; E14B21 Texcoco; E14A29 Cuautitlán; E14B31 Chalco de Díaz Covarrubias, escala 1:50 000. Obtenido de archivos de INEGI.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017, 2014). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica de; E14B21 Texcoco; E14A29 Cuautitlán; E14B31 Chalco de Díaz Covarrubias, escala 1:50 000 serie III. Obtenido de INEGI: <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>

Koefoed, O. (1979). *Geosounding Principles, 1: Resistivity Sounding Measurements*. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam, 277 pp.

López-Loera, H. (2014). Geofísica para la localización de Agua Subterránea en Ambientes Volcánicos Áridos de la Mesa Central. Caso La Dulcita, Villa de

Ramos, San Luis Potosí, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 66 (1), 165-181. Consultado de [http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/6601/\(12\)Lopez.pdf](http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/6601/(12)Lopez.pdf)

Okonkwo A C., Ugwu G Z. (2015) Determination of Dar-Zarrouk parameters for prediction of aquifer protective capacity: a case of Agbani sandstone aquifer, Enugu state, southeastern Nigeria. *Int. Res. J. Geol. Min. (IRJGM)*. 5(2),12-19. Consultado en <http://www.interesjournals.org/irjgm>. <http://dx.doi.org/10.14303/irjgm.2015.107>.

Orellana, E. (1982). *Prospección Geofísica de corriente continua*. (2da Ed). Madrid, España. 578 pp.

Oladapo M.I. & Akintorinwa O.J. (2007). Hydrogeophysical study of Ogbese Southwestern, Nigeria. *Global J. Pure and App. Sci.* 13(1), 55-61. <http://www.doi.org/10.4314/gjpas.v13i1.16669>

Prashant K., Praveen K.T., y Sanjit K.D. (2020). *Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping using Drastic Model*. Florida, USA. CRC Press. Taylor & Francis Group LLC, 120 pp.

Ramos-Leal, J. Ramos-Leal, C; Noyola C; Tapia O. (2010). Aquifer vulnerability and groundwater quality in mega cities: Case of the Mexico Basin. *Project: Applied Geomatics for Natural Resources. Environmental Earth Sciences* 61(6),1309-1320. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0434-5>

Reynolds, D.W., y Elrick, D.E. (1986). *A Method for Simultaneous In Situ Measurement in the Vadose Zone of Field-Saturated Hydraulic Conductivity, Sorptivity and the Conductivity-Pressure Head Relationship*. USA: Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1986.tb01229.x>

SEMARNAT (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación 23 de abril 2003.

Ugwu N., Ranganai R., Simon R., and Ogubazghi G. (2016) Geoelectric Evaluation of Groundwater Potential and Vulnerability of Overburden Aquifers at Onibu-Eja Active Open Dumpsite, Osogbo, Southwestern Nigeria. *Journal of Water Resource and Protection* 8(3), 311-329 [en línea]. Consultado en Scientific Research an Academic Publisher. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=64880>. DOI <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.83026>.

4. Estimación de la conductividad hidráulica en el área de influencia al acuífero de Texcoco, Estado de México.

Ma. de Lourdes Vázquez-Castro¹; Mauricio Carrillo-García^{2*}; Lázaro Raymundo Reyes-Gutiérrez³; Aurelio Reyes-Ramírez²

¹ Estudiante del posgrado IAUJA en la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, C.P. 56230. México. (+52) 595 952 1551. lourdesvc@msn.com

^{2*} Profesor investigador del departamento de Irrigación en la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México; C.P. 56230. México. (+52) 595 952 1551. mauricio@correo.chapingo.mx (autor corresponsal*).

³ Profesor investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Lerma. Av. De las Garzas No 10, Col. El Panteón, Lerma de Villada, Estado de México.

4.1. Resumen

Introducción: La conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}) permite detectar zonas con potencial de infiltración, mientras que los estudios geoelectricos identifican estratos subyacentes que constituyen al acuífero.

Objetivo: Determinar K_{fs} a través de la resolución de ecuaciones: Kostiakov, Horton y Reynolds-Elrick e identificar los estratos subyacentes al acuífero con estudios geoelectricos resistivos.

Metodología: Se realizan mediciones en campo con la técnica de doble cilindro y permeámetro tipo Guelph (5 y 10 cm). Así como estudios geoelectricos con tomografía eléctrica vertical (TER) en puntos estratégicos de la zona del acuífero.

Resultados: Se obtuvieron valores de $K_{fs}=0.025$ a 7.61 md^{-1} (Kostiakov), $K_{fs}=0.029$ a 3.89 md^{-1} (Horton), $K_{fs}=0.014$ a 1.98 md^{-1} (Reynolds-Elrick). El perfilado de tomografías eléctricas verticales (TER) identifico zonas permeables, con valores de resistividad de 35 a $120 \Omega\text{m}$.

Limitaciones del estudio: Los estudios geoelectricos resistivos detectan la resistividad eléctrica del suelo con un rango de variación amplia. Mientras que las medidas de K_{fs} , en la superficie del suelo son propias en el punto de análisis.

Originalidad: Los resultados obtenidos servirán para delimitar las zonas permeables e impermeables y para la elaboración de mapas de vulnerabilidad acuífera.

Conclusiones: Las zonas permeables se localizan al norte y noreste del acuífero, donde existe material tipo andesita y basalto, así como zonas puntuales del municipio de Texcoco y en las inmediaciones del cerro Las Promesas y el monte Tláloc (zona oriente del acuífero). Mientras que la zona con menor capacidad de infiltración se localiza al poniente del acuífero.

Palabras clave: estudios geoelectricos, infiltración, permeámetro Guelph.

Ideas sobresalientes:

Conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) delimita zonas permeables en la capa superior del suelo. Tomografía eléctrica vertical, permite identificar materiales en el subsuelo.

Delimitar zonas permeables e impermeables en el área de influencia al acuífero de Texcoco.

¹ Tesis de Doctorado en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor : Ma. de Lourdes Vázquez Castro

Director : Dr. Mauricio Carrillo García

Estimation of hydraulic conductivity over the area of influence of the Texcoco aquifer, State of Mexico

Ma. de Lourdes Vázquez-Castro¹ ; Mauricio Carrillo-García^{2*}; Lázaro Raymundo Reyes-Gutiérrez^{3*}; Aurelio Reyes-Ramírez².

¹ IAUIA graduate student, Universidad Autónoma Chapingo. Carr. México - Texcoco, Km 38.5. Chapingo, State of Mexico. C.P. 56230. México. (+52) 595 952 1551. lourdesvc@msn.com

² Research professor of the Department of Irrigation, Universidad Autónoma Chapingo. Carr. México - Texcoco, Km 38.5. Chapingo, State of Mexico. C.P. 56230. México. (+52) 595 952 1551. mauricio@correo.chapingo.mx (Corresponding author*)

³ Research Professor. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Lerma Av. De las Garzas No 10, Col. El Panteón, Lerma de Villada, State of Mexico, C.P.52005 México. (+52) 728 282 7002.

4.2. Abstract

Introduction: Field saturated hydraulic conductivity (K_{fs}) allows detecting areas with infiltration potential, while geoelectric studies identify underlying strata that constitute the aquifer.

Objective: Determine K_{fs} through the resolution of equations: Kostiakov, Horton and Reynolds-Elrick and identify the underlying strata of the aquifer with resistive geoelectric studies.

Methodology: Field measurements are made with the double cylinder technique and Guelph type permeameter (5 and 10 cm). As well as geoelectric studies with vertical electrical tomography (TER) at strategic points in the aquifer area.

Results: $K_{fs} = 0.025$ to 11.14 md^{-1} (Kostiakov), $K_{fs} = 0.029$ to 3.89 md^{-1} (Horton), $K_{fs} = 0.014$ to 1.98 md^{-1} (Reynolds-Elrick) were obtained. Vertical electrical tomography (ERT) profiling identified permeable areas, with resistivity values ranging from 35 to 120 Ωm .

Study Limitations: Resistive geoelectric studies detect the electrical resistivity of the soil with a wide range of variation. While the K_{fs} measurements on the soil surface are proper at the point of analysis.

Originality: The results obtained will be used to delimit permeable and impervious areas and for the elaboration of aquifer vulnerability maps.

Conclusions: The permeable zones are located to the north and northeast of the aquifer, where there is andesite and basalt-type material, as well as specific areas of the municipality of Texcoco and in the vicinity of Cerro Las Promesas and Mount Tlaloc (eastern zone of the aquifer). While the zone with less infiltration capacity is located to the west of the aquifer.

Keywords: geoelectric studies, infiltration, Guelph permeameter.

Outstanding ideas:

Saturated hydraulic conductivity (K_{fs}) delimits permeable zones in the upper soil layer.

Vertical electrical tomography allows to identify materials in the subsoil.

Delimit permeable and impermeable zones over the area of influence to the Texcoco aquifer.

¹ Doctoral thesis, Postgraduate in Agricultural Engineering and Integrated Use of Water, Universidad Autónoma Chapingo.

Author : Ma. de Lourdes Vázquez Castro.

Advisor : Dr. Mauricio Carrillo García.

4.3. Introducción

En Texcoco Estado de México, se localiza uno de los acuíferos más importantes y sobreexplotados del Valle de México, abastece de agua al menos 13 municipios de la parte oriente de la región, con un déficit de -111.8666 hm^3 . La sobreexplotación de este acuífero ha ocasionado un acelerado descenso de los niveles de agua subterránea de varios metros con respecto a su nivel natural, localizando niveles entre 40 y más de 130 m de profundidad con respecto a la superficie del terreno y bajan a un ritmo acelerado de entre uno a casi cuatro metros en promedio por año (DOF, 2019).

La zona donde se asienta el acuífero de Texcoco cuenta con un potencial económico favorable, producto de actividades como la minería, industria y la agricultura. Sin embargo, en la región, se ha generado un polo de crecimiento demográfico que puede contribuir a la alteración de la calidad del agua subterránea por las diversas actividades socioeconómicas que se desarrollan, ocasionando una escasez severa y competencia cada vez creciente, por el uso del agua entre los diferentes sectores. La falta de lluvia y la baja disponibilidad de fuentes superficiales de agua potable, ha orillado a la población a utilizar, grandes cantidades de agua subterránea, hasta el grado de convertirse en un problema de abasto y una amenaza para el desarrollo sustentable. Esta situación, debe tomarse en cuenta para poner en alerta a las autoridades competentes del manejo de los recursos hídricos.

El conocer parámetros de campo como; permeabilidad, velocidad de infiltración y conductividad hidráulica saturada en campo (K_{fs}), en puntos estratégicos dentro de la zona del acuífero, permite identificar las zonas permeables e impermeables, en la capa superior del suelo, que presenten riesgo de infiltración de algún contaminante depositado en la superficie del suelo. Mientras que los estudios geoelectrónicos identifican, de manera indirecta, los estratos subyacentes que constituyen el acuífero. De esta manera se podrá conocer y proponer alternativas

para evitar que sustancias arrastradas en la superficie del terreno por el agua de lluvia o agua de corrientes superficiales, con alta carga de sustancias tóxicas, se infiltren al subsuelo y lleguen a la zona saturada.

El objetivo de este trabajo es determinar la variabilidad de la conductividad hidráulica saturada, en la capa superficial de la zona del acuífero de Texcoco, Estado de México, utilizando métodos que se basan en una descripción analítica del proceso de infiltración, a partir de datos medidos en campo que proporcionan soluciones aproximadas como las ecuaciones de Kostiakov, Horton, Reynolds y Elrick (permeámetro Guelph). Además, se emplearon técnicas geoelectricas resistivas como la Tomografía eléctrica vertical (TER), logrando identificar las zonas con mayor permeabilidad, susceptibles de infiltrar sustancias al agua subterránea, que puedan alterar su calidad. La base de datos de esta información servirá para estudios hidrogeológicos futuros, como mapas de vulnerabilidad y riesgo a la contaminación, mediante simulación numérica.

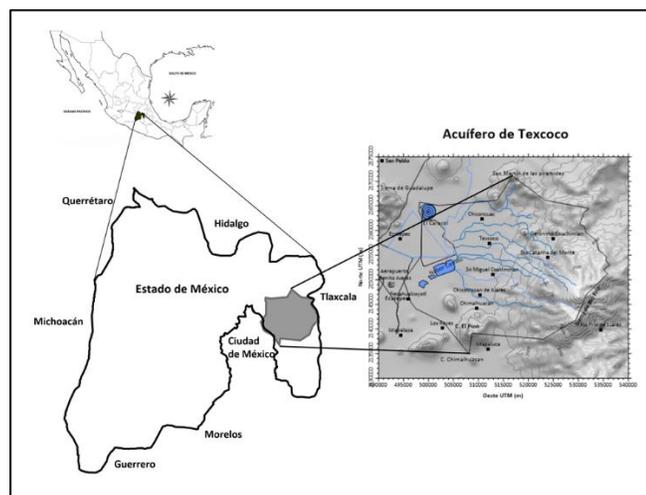


Figura 33. Ubicación del acuífero de Texcoco, Estado de México.

4.4. Materiales y métodos

Localización y esquema geológico del área de estudio

El acuífero de Texcoco pertenece a la región Hidrológica Administrativa XIII, se localiza geográficamente entre los paralelos 19° 18' y 19° 38' de latitud norte y meridianos 98° 39' y 99° 03' de longitud oeste, posicionándose en la zona oriente del estado de México, donde se formó la cuenca endorreica del Valle de México, producto de emanaciones volcánicas que dieron origen a la sierra Chichinautzin y cerraron el cauce natural de la cuenca (Figura 33). El subsuelo de la cuenca está formado por sedimentos marinos de rocas calizas que corresponden al periodo cretácico, intercalados se encuentran materiales producto de eventos volcánicos como lavas, tobas y cenizas que incluyen materiales granulares transportados de las partes altas y que rellenaron el Valle. El material semipermeable del acuífero de Texcoco lo constituyen arcillas y arenas finas de alta porosidad y baja permeabilidad distribuidas en la zona superior del acuífero, con espesor de entre 40 y 60 metros, que se acuña hacia sus bordes, el espesor mayor de este material se localiza cerca de los pozos ramal Texcoco. Debido al paquete arcilloso y su distribución en la zona superior, el acuífero de Texcoco se clasifica de libre a semiconfinado (DOF, 2019).

La superficie que comprende al acuífero se delimitó en un plano que abarca 64 celdas, el cual permitió realizar un mallado de 8X8 celdas, con la finalidad de cubrir la zona de interés. Para establecer las zonas de muestreo y los puntos de medición, se realizó un recorrido por el área y se ubicaron los puntos de trabajo con un GPS Gamín® en el momento de la colección de las muestras (Figura 34).

El periodo de muestreo y medición de infiltración se realizó en los meses de abril-diciembre 2019 y enero-marzo 2020.

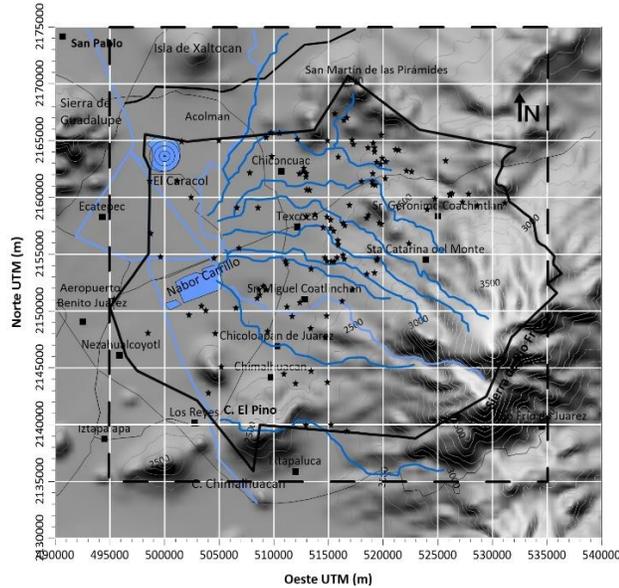


Figura 34. Delimitación del área de estudio y ubicación de los sitios de medición.

Métodos para infiltración y conductividad hidráulica saturada.

Existe una amplia gama de métodos para estimar el valor de la conductividad hidráulica saturada (K_s), tanto en campo como en laboratorio. Los métodos realizados en condiciones naturales (*in situ*), permiten determinar características hidráulicas con la ventaja de que se realizan en condiciones, acordes con la realidad, pero con la desventaja de presentar dudas sobre el volumen de muestra y no poder determinar fácilmente el frente húmedo, además se necesita un gran número de mediciones, lo que representa altos costos y tiempo en trabajo de campo. Las técnicas aplicadas en el laboratorio requieren mayor tiempo en la preparación de la muestra, para su posterior análisis, permitiendo un mejor control de las condiciones experimentales, pero se corre el riesgo de tener muestras alteradas por la manipulación del muestreo y transporte. Diferentes estudios han demostrado, que los métodos de laboratorio presentan baja correlación con respecto a los resultados de los métodos realizados en campo (Merli, Cappati y Dezi, 2016). Cualquier técnica empleada, tiene intervalos

específicos de aplicabilidad con respecto al tipo y a la saturación del suelo (Lozano, *et al.*, 2005).

El Método de Kostiakov (1932), se basa en la lámina de infiltración acumulada y en la determinación de las constantes, que son calculadas de gráficas a partir de datos empíricos (ecuación 1).

$$I = at^b \quad (1)$$

Donde; a y b son parámetros del modelo, que cumplen las restricciones;

$$a > 0 \text{ y } 0 < b < 1.$$

I lámina infiltrada [$\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$]

t tiempo [min]

Cuando el tiempo es muy grande la velocidad de infiltración se establece en un valor constante, logrando relacionarse con la velocidad de infiltración básica (I_b) [$\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$].

Para evaluar el modelo de Kostiakov se requiere determinar la infiltración básica definida como la velocidad de entrada del agua para un periodo donde la tasa de infiltración se mantiene constante y se determina como el 10% o menos de este valor, conforme lo establecido por el Servicio de Conservación de suelos (SCS) y el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), se puede expresar de acuerdo con la ecuación 2, (Orjuela-Matta, 2010).

$$t_{Ib} = -600 b \quad (2)$$

Donde;

b exponente de la ecuación de Kostiakov, para cada punto de estudio.

t_{Ib} tiempo en que ocurre la infiltración básica [min].

Por último, se determinará la velocidad de infiltración cuando el tiempo para llegar al valor óptimo de infiltración básica, está en función de ambas constantes de la ecuación de Kostiakov; esta ecuación también fue propuesta por SCS, USDA y es ampliamente aplicado por el Ministerio de Agricultura, ganadería y pesca en Argentina (PROSAP):

$$T_b = \left(\frac{-0.1}{k * -n} \right)^{\frac{1}{m-2}} \quad (3)$$

Donde; $-n = b$; $m = 1 + b$ y $k = a * b * 10 * 60$

Los valores de; n, m, k, a y b están en función de las constantes de la ecuación de Kostiakov, [adimensional].

T_b tiempo en que ocurre la infiltración básica [h].

El Modelo de Horton (1939), es un modelo empírico, propuesto por numerosas observaciones experimentales. Expresa matemáticamente la curva de la capacidad de infiltración (I), corresponde a un modelo de tres parámetros a calcular (ecuación 2). Estos parámetros están asociados a los suelos y su cubierta vegetal (Weber, 2014).

$$I = I_b + (I_i - I_b)[e^{-kt}] \quad (2)$$

I_b velocidad de infiltración final [$\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$]

I_i velocidad de infiltración inicial [$\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$]

e^{-kt} base de logaritmo a la potencia $-kt$

k constante [h^{-1}]

t tiempo [horas]

Método Elrick y Reynolds (1986). Se utilizó el permeámetro de Guelph, tiene su fundamento en el principio del frasco de Marriot, con carga hidráulica constante

en un pozo pequeño perforado en el suelo, midiendo el flujo de recarga necesario para mantener constante la altura del agua en el pozo. Logrando determinar la K_{fs} en la zona no saturada del acuífero, así como el potencial mátrico (ϕ_m), hasta una profundidad de alrededor de 2 metros (Dafonte, et al., 1999).

La recarga del flujo permanente, situado en suelo no saturado es de tipo tridimensional, dentro de un pozo cilíndrico. El flujo que se infiltra en el pozo, con un radio (a) y una altura constante (H), donde el medio poroso es homogéneo e isotrópico, de acuerdo con la ley de Darcy, se puede expresar de acuerdo con la ecuación (3), (Elrick y Reynolds, 1992);

$$Q = f(H, a)K_{fs} + g(H, a)\phi_m \quad (3)$$

Donde: Q [$m^3 \cdot s^{-1}$], representa el caudal de recarga permanente; H [m], es la carga hidráulica en el pozo; a [m], radio del pozo; K_{fs} [$m \cdot s^{-1}$], conductividad hidráulica saturada en campo; ϕ_m [$m^2 \cdot s^{-1}$], potencial de flujo mátrico.

Desarrollando la ecuación (3), se obtiene para el caudal de infiltración la expresión de la ecuación (4), (Luna-Saéz, Sánchez-Reyes y Muñoz-Pardo, 2005; Dafonte, et al., 1999).

$$Q = \frac{2\pi H^2}{C} K_{fs} + \frac{2\pi H}{C} + \frac{K_{fs}}{\alpha} + \pi a^2 K_{fs} \quad (4)$$

Donde: C es un factor adimensional que depende de la relación de la carga hidráulica y radio del pozo (H/a). Los términos de la ecuación (4), incorporan el volumen y velocidad del flujo de agua, debido al gradiente de presión (carga hidráulica), a través del pozo.

Método geoeléctrico resistivo

En la campaña de toma de datos geoeléctricos. Se realizaron 12 perfiles resistivos con un Tomógrafo eléctrico marca ABEM Terrameter LS[®], y sus

accesorios. En el desarrollo de este trabajo, se utilizó el arreglo interelectrónico tipo gradiente, representado el acomodo de electrodos como se observa en la Figura 35 y el factor geométrico determinado por la ecuación (5), (Geotomo, 2019).

$$k = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1}\right) - \left(\frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3}\right) + \left(\frac{1}{r_4}\right)\right]} \quad (5)$$

Donde:

$$r_1 = na ; r_2 = (n + 1)a ; r_3 = (s + 2 - n)a ; r_4 = (s + 1 - n)a$$

Cada una de las variables expresadas en la ecuación (5), representa la distancia en [m] del espaciamiento de los electrodos del arreglo gradiente y k el factor geométrico del arreglo [m⁻¹]

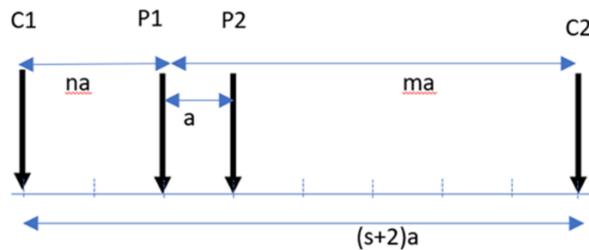


Figura 35. Arreglo interelectrónico tipo gradiente.

Los datos de resistividad aparente y las pseudo-secciones eléctricas, se obtuvieron al utilizar el ABEM Terrameter LS® con cuatro carretes de cable de tendido multielectrónico con una longitud de 100 metros cada uno, y toma de corriente a cada 5 m. Se utilizaron en total 82 electrodos de acero inoxidable. Para establecer conexión entre electrodo y cable, se adición una solución electrolítica (NaCl 5% en peso), con la finalidad de mejorar el contacto en suelos

muy secos. Una vez instalado todo el equipo se comienza el sondeo con el arreglo seleccionado. Los datos se registran de manera automática y son guardados en la memoria del equipo ABEM Terrameter LS®, con el arreglo seleccionado.

Para el procesamiento de los datos se utilizó el software RES2DIVN, mediante el proceso de inversión por iteraciones de diferencias finitas y un método de optimización no lineal iterativo, se obtuvo el modelo de resistividades en 2D a partir de la pseudosección de resistividades aparentes obtenidas del sitio de estudio (Loke, et al., 2013).

La convergencia del modelo se aprecia cuando el modelo de las pseudosecciones de resistividades calculadas convergen con las resistividades tomadas en campo con un error medio cuadrático menor al 10 % (Briceño y Avellaneda, 2001).

4.5. Resultados y Análisis de resultados

Para los resultados de infiltración obtenidos en campo y la determinación de K_{fs} , se utilizó; la técnica de infiltración de doble cilindro y el permeámetro de Guelph, así como los procedimientos de resolución de las ecuaciones de los modelos (Kostiakov, Horton, Reynolds y Elrick).

Con el método Guelph se determinó K_{fs} , con dos cargas de columna de agua (5 y 10 cm), las cuales permitieron mapear la variación de la conductividad hidráulica. El ajuste geoestadístico de los datos (K_{fs}), se realizó por predicción estadística de la técnica kriging y con apoyo del software Surfer V16 (Figura 36).

La distribución de las zonas con K_{fs} de media-baja (0.6 a 1.2 m·d⁻¹) se identificaron en la mayor superficie de la zona de estudio, extendiéndose sobre la zona centro con dirección al sur y este del acuífero, también abarca la zona noreste (con excepción de algunas zonas aisladas).

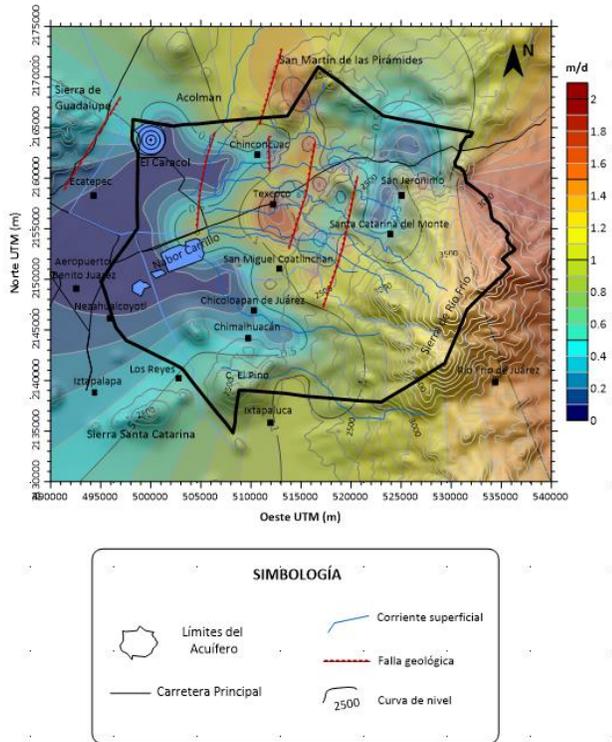


Figura 36. Distribución espacial de K_{fs} técnica del permeámetro Guelph (profundidad 60 cm).

En las inmediaciones de San Salvador Atenco, Chiconcuac, Santa Catarina del Monte y los Reyes, se determinaron valores de K_{fs} entre 0.2 y 0.5 $m \cdot d^{-1}$. La mayor tasa de infiltración se identificó entre Acolman y San Martín de las Pirámides, así como en localidades como; Tezoyuca, Tlaixpan, San Jerónimo y al este de Santa Catarina del Monte con dirección al estado de Tlaxcala, donde los valores de K_{fs} oscilaron entre 1.3 a 2 $m \cdot d^{-1}$, la mayoría de estas comunidades se ubican en la zona norte y oriente del acuífero, con dirección al monte Tláloc. En la zona centro de Texcoco, también, se presentaron algunos puntos aislados con infiltración de buena a moderada, en comunidades como; Montecillos, Chapingo, Xocotlán, La Resurrección y San Simón (1.5 a 2 $m \cdot d^{-1}$).

En general, se obtuvieron valores de conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}) desde; suelos prácticamente impermeables ($0.014 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$), hasta suelos con características que permiten una infiltración medianamente alta ($2.0 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$).

El procedimiento para conocer la tasa de infiltración básica, con la técnica de doble cilindro, solo pudo ser aplicada en poco menos del 50% de los sitios programados para el estudio. La limitante fue que en algunos lugares el suelo presentaba grandes rocas que no permitían un correcto ajuste de los cilindros, así como los lugares restringidos, limitados por el tiempo de permanencia y/o difícil acceso (este equipo es más complicado su traslado, maniobra y ajuste que el permeámetro de Guelph), otra de las limitantes fue la cantidad de agua necesaria para saturar el espacio de trabajo, debido a que este equipo requirió hasta un 450 % de agua más que el permeámetro Guelph. Lo que repercutió en los gastos de campo (tiempo y costo).

Los 60 sitios en donde se determinó la tasa de infiltración (técnica de doble cilindro) para el cálculo de la infiltración básica por los métodos de Kostiaikov y Horton, permitieron obtener los mapas de la variación de la conductividad hidráulica. Se realizó el procesamiento de datos con Surfer V16. El ajuste geoestadístico de los datos (K_{fs}), se realiza por predicción estadística de la técnica kriging.

Los valores de K_{fs} , por el método de Kostiaikov, se determinaron por medio de la infiltración acumulada I_{acum} , graficando tiempo de infiltración contra la lámina acumulada. Se realizó un ajuste lineal a los datos por mínimos cuadrados, al graficar logaritmo de tiempo acumulado contra el logaritmo de la lámina acumulada, para determinar las constantes de la ecuación de Kostiaikov. Se obtuvieron tres series de datos, de acuerdo con el criterio establecido; uno con los datos recopilados en campo y graficando lámina acumulada contra tiempo (Figura 37).

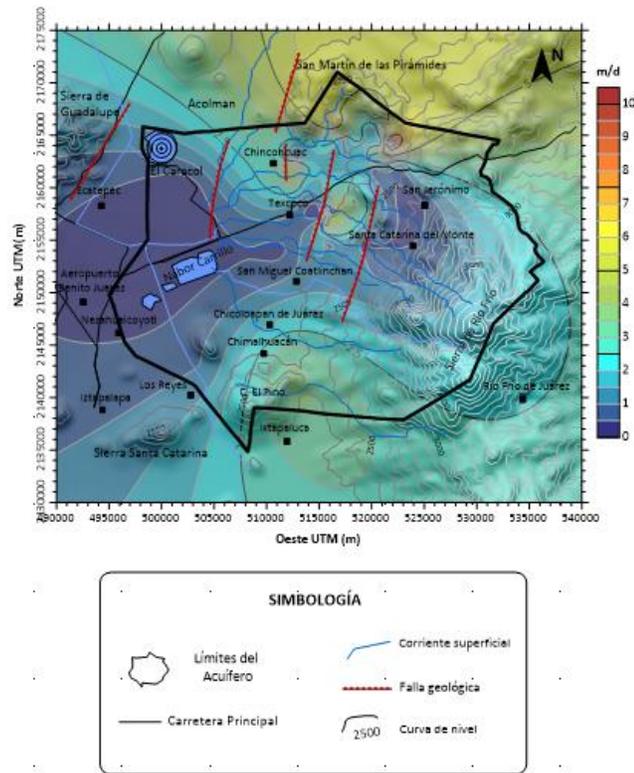


Figura 37. Distribución espacial de K_{fs} (Kostiakov). Lámina infiltrada contra tiempo (profundidad 15 cm).

Mientras que, aplicando tratamiento analítico, se calculó el tiempo en que se presenta la infiltración básica de acuerdo con los criterios del Departamento de agricultura de Estados Unidos (USDA) y el aplicado por el Ministerio de Agricultura, ganadería pesca en Argentina (PROSAP). Las Figuras 38 y 39 representan la variación espacial de K_{fs} al definir el tiempo en que se estabiliza la velocidad de infiltración; al considerar el valor de la velocidad de entrada del agua para un periodo de tiempo del 10% menor al tiempo determinado cuando la tasa de infiltración se mantiene constante y con el tiempo de infiltración básica calculado en función de ambas constantes de la ecuación de Kostiakov, respectivamente.

La variabilidad espacial de la K_{fs} aplicando Kostiakov por el método directo, resulto con un rango de valores mayores (0.059 a 11.14 $m \cdot d^{-1}$), mientras que la técnica de tubo de Marriot (permeámetro de Guelph) presento el rango de valores menores, esto se debe a que la técnica de doble cilindro presentó mayor variabilidad en las medidas de velocidad instantánea, así como el tiempo para alcanzar la velocidad constante, además con esta técnica se considera que toda el agua infiltrada presenta dirección vertical.

Con el método de Horton (Figura 40), se detectan las zonas permeables al norte (2.8 a 3.9 $m \cdot d^{-1}$), media-baja permeabilidad al noreste (1.2 a 2.4 $m \cdot d^{-1}$), una zona puntual al sur con buena capacidad de infiltración (2.4 a 3.9 $m \cdot d^{-1}$). Se identifican las zonas con la menor capacidad de infiltración desde la zona centro con dirección al poniente y noroeste del acuífero (0.1 a 0.8 $m \cdot d^{-1}$).

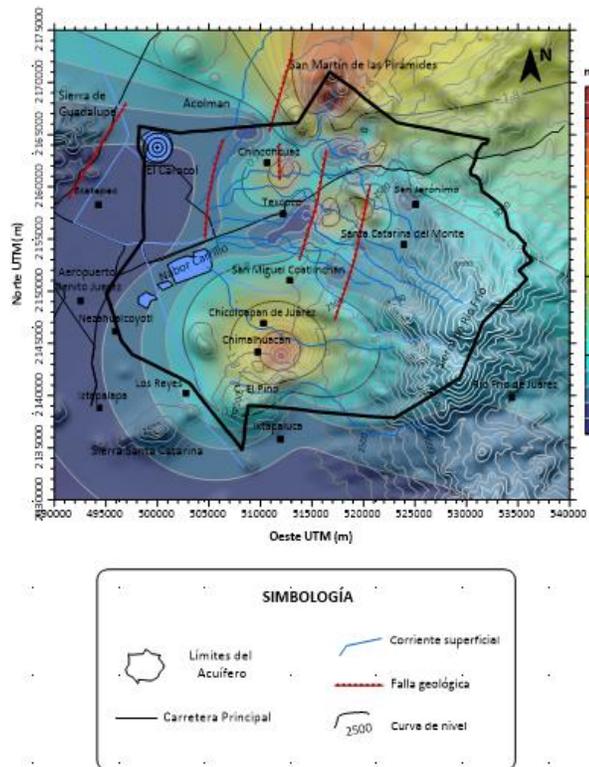


Figura 40. Distribución espacial de K_{fs} (Horton).

Para caracterizar el suelo en algunas zonas, se aplicaron técnicas geoelectricas resistivas (TER); las zonas de interés son las detectadas con valores de infiltración básica alta (3.8 a 11 m·d⁻¹), como la zona norte del acuífero y algunas zonas puntuales en el centro del acuífero.

Uno de los estudios se realizó en límite norte del acuífero (UTM Zona 14 Q; 511813.03 m, E; 2166461.11 m N), en el municipio de Tezoyuca, con dirección Norte-Sur, arreglo tipo gradiente (4x21) (Figura 41). La capa superficial presentó resistividad aparente (ρ_a) entre 15.5 a 37.0 ohm·m, este primer estrato corresponde a la cobertura superficial del suelo, la cual se encuentra ligeramente compactada, con material granular semiconsolidado de arenas gruesas y medias extendiéndose a una profundidad no mayor a 1.5 m.

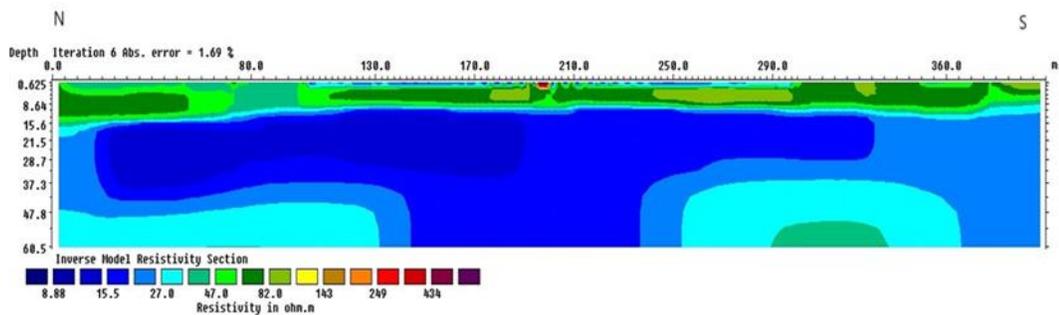


Figura 41. Tomografía eléctrica vertical (TER), Tezoyuca, Estado de México.

El segundo estrato, se extiende a lo largo del perfil con un espesor promedio de 14.0 m, corresponde a material con resistividad aparente de 37.0 a 82.0 ohm·m, tipo aluvial y lacustre, presencia de arenas gruesas en una matriz de arcillas. El siguiente estrato presenta en su mayoría material lacustre, material granular semiconsolidado, con arenas finas en una matriz de arcillo-limosa (8.0 a 21.2 ohm·m), que se localiza en la parte central del perfil y se extiende a lo largo del corte, encerrando material no consolidado con un porcentaje elevado de arcilla (6.0 a 8.8 ohm·m), con dirección de norte a sur, presentando su mayor espesor en la zona centro del perfil. Con valores de resistividad aparente de 27.0 a 35.1

ohm·m, se localiza material tipo aluvial y lacustre, arenas finas y medias en una matriz de arcillas con permeabilidad media, este material está presente, principalmente, en los extremos inferiores del perfil, con espesor promedio de 23 m, considerándose como el límite superior de la zona saturada del acuífero, a una profundidad promedio de 47.0 m en adelante.

Otra zona de interés fue el municipio de Papalotla, ubicado en la zona noreste del acuífero, (zona detectada con permeabilidad media-alta). El estudio geoelectrico se realiza cerca de la comunidad de Tepetitlán, municipio de Papalotla, en el estado de México, con orientación Sur-Norte, y un arreglo de Gradiente (4X21), espaciamiento de electrodos 5 m.

En el perfil (Figura 42), se aplicó discretización de celda por refinamiento, los valores de resistividad aparente fueron de 39.2 a 81.4 ohm·m, cubriendo la mayor área del perfil (presencia de gravas y arenas), material que delimita o encierra zonas con mayor permeabilidad, infiriendo zonas saturadas con mayor contenido de arenas gruesas y roca ígnea por acarreo del cerro de las promesas (81.4 a 169 ohm·m).

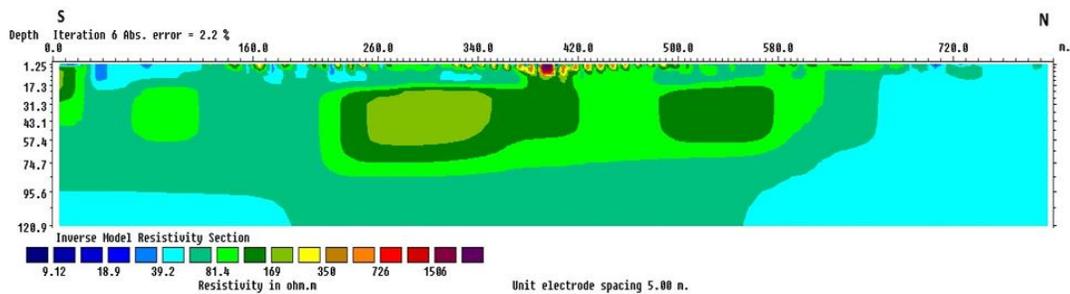


Figura 42. Tomografía eléctrica vertical (TER), Papalotla, Estado de México.

Se identificó presencia de tobas arenosas de grano fino y arcillas, en la capa superior del perfil distribuida de manera heterogénea (18.9 a 39.2 ohm·m), así como roca compacta tipo boleos en la superficie del suelo, cubriendo pequeñas áreas en la zona de trabajo, con valores de resistividad de 350 a 1506 ohm·m,

en el centro y dirección norte del perfil. Finalmente, en el límite inferior del perfil, tanto en dirección sur como norte, se localizó material permeable de tipo tobas arenosas de grano mediano a fino en una matriz del limo, probable zona saturada del acuífero con resistividades que oscilan entre 39.2 a 60.3 ohm·m, cubriendo por completo la zona norte del perfil.

4.6. Conclusiones

Los estudios realizados para determinar la K_{fs} presentaron rangos de variación entre cada una de las metodologías aplicadas; Datos en campo de infiltración base (0.06 a 11.14 $m \cdot d^{-1}$); método de Kostiaikov (0.025 a 7.61 $m \cdot d^{-1}$), Horton (0.029 a 4.20 $m \cdot d^{-1}$), permeámetro de Guelph (0.014 a 1.98 $m \cdot d^{-1}$).

Los valores de K_{fs} menores se obtuvieron por la técnica del permeámetro de Guelph, esto debido a que la metodología considera en los cálculos factores como tipo de suelo y estructura, por lo que no todo el volumen infiltrado discurre en dirección vertical, sino que también considera la velocidad del flujo en dirección lateral.

En general los sitios que se identificaron con permeabilidad de media a alta, de cada metodología aplicada, inciden en localizar la zona con mayor capacidad de infiltración al norte y noreste del acuífero, donde se localizan materiales tipo andesita y basalto, producto de los eventos volcánicos del cuaternario y en las inmediaciones del cerro Las Promesas y el monte Tláloc. Mientras que la zona con menor capacidad de infiltración se localiza al poniente del acuífero, en la zona lacustre del valle de Texcoco y zonas puntuales donde la población a ocupado espacios, compactando y realizando edificaciones.

Los estudios geoelectrónicos resistivos, ayudaron a identificar, en las zonas detectadas con permeabilidad de media a alta, materiales no consolidados de granulometría variada compuesta principalmente con arenas en una matriz de

arcillo-limosa y presencia de material fracturado de tipo basalto y andesita, lo cual le confiere propiedades que permiten la infiltración a estratos profundos.

Al aplicar métodos físicos y geoelectricos para localizar zonas con capacidad de infiltración, se puede identificar, con mayor certeza, las zonas vulnerables que pueden infiltrar algún tipo de sustancia tóxica al agua subterránea, mermando su calidad. Con la combinación y análisis de los métodos aplicados en este trabajo, fue posible identificar zonas clave del acuífero, ubicadas principalmente en el norte y noreste del acuífero de Texcoco, esta información permitirá continuar con la realización de mapas de vulnerabilidad y riesgo a la contaminación, para servir como herramienta en el plan de manejo del agua subterránea y ordenamiento territorial en la zona de recarga del acuífero de Texcoco.

4.7. Literatura Citada

Briceño, L. A., y Avellaneda-López, P. M. (2001). Modelación del problema inverso en geoelectrica 2D, mediante elementos finitos. *Earth Sciences Research Journal*, (5), 12-17. Consultado en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/esrj/article/view/31289>

Dafonte, J. D., Valcárcel-Armesto M., Neira-Seijo. X., y Paz-Gonzalez. A. (1999). Análisis de los métodos de cálculo de la conductividad hidráulica saturada de campo medida con permeámetro Guelph. Pp 5-10. En R. Muñoz-Carpena, Ritter, y Tascón (eds). *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*. Instituto Canario de Investigaciones en Ciencias Agrarias, CIA, Tenerife, España. ISBN 84-699-1258-5.

DOF. Diario Oficial de la Federación. (2019). Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Texcoco, clave 1507, en el Estado de México, Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. Ciudad de México: SEGOB.

Elrick, D. E., Reynolds, W. D. (1992). Methods for Analyzing Constanhead well Permeameter data. *Soil Science Society of America Journal* 56, 320-323. DOI <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600010052x>

Geotomo. (mayo de 2019). Geotomo Software GS. Consultado el 3 de febrero de 2020, de Resistivity & IP Imaging. Fast Inversions in Windows 7/8/10: 2D & 3D: <http://geotomosoft.com>

Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D., Kuras, O., & Wilkinson, P. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal*

of Applied Geophysics, 95, 135-156. DOI
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.017>

Lozano, J., Madero, E., Tafur, H., Herrera, O., y Amézquita, E. (2005). La conductividad hidráulica del suelo estudiada en el Valle del Cauca con el nuevo indicador del USDA. *Acta Agronómica*, 54(3). Consultado el 6 de marzo de 2019, de Redalyc.org: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169920338002>

Luna-Sáez, D., Sánchez-Reyes, C., y Muñoz-Pardo, J. (2005). Métodos para medir la conductividad hidráulica saturada de campo. *Ingeniería Hidráulica en México*, 20 (2), 95-107.

Merli, A., Cappati, M., y Dezi, F. (2016). Different measuring methods for estimating the hydraulic conductivity on the shallow aquifer along a stretch of the Rimini Coast. *Procedia Engineering*, 434-439. DOI
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.468>

Orjuela-Matta, H.M., Rubiano-Sanabria, Y., Camacho-Tamayo J.H. (2010). Comportamiento de la infiltración en un Oxisol. *Rev. U.D.C.A Actualidad. Y Divulgación científica*, 13 (2), 31-39. DOI
<https://doi.org/10.31910/rudca.v13.n2.2010.726>.

PROSAP. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Argentina. (s/f). Medición de la infiltración en el suelo (R014). Consultado el 12 de diciembre de 2019, de Programa de Servicios Agrícolas Provinciales: http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO%20_R014_%20infiltrometro%20doble%20anillo.pdf

Reynolds, D., y Elrick, D. E. (1986). A Method for Simultaneous In Situ Measurement in the Vadose Zone of Field-Saturated Hydraulic Conductivity, Sorptivity and the Conductivity-Pressure Head Relationship. USA: Wiley Online Library. DOI <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1986.tb01229.x> Weber, J. F. (2014). Parameters of Horton's infiltration model obtained through the use of a rainfall simulator, Córdoba, Argentina. *Revista Ambiental del Agua*, On-line version ISSN 1980-993X. DOI <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1>

5. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA EN CERRO COLORADO, MUNICIPIO DE ATOTONILCO EL GRANDE, ESTADO DE HIDALGO

5.1. Carta de aceptación de Academia Journals



PROSPECCIÓN GEOFÍSICA EN CERRO COLORADO MUNICIPIO DE ATOTONILCO EL GRANDE, ESTADO DE HIDALGO.

M en I. A. Ma de Lourdes Vázquez Castro¹, Vicente de Jesús Vega Blancas², Ismael González
Fernández³ y Dr. Aurelio Reyes Ramírez⁴

¹ Estudiante del posgrado IAUIA en la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, lourdesvc@msn.com (autor correspondiente).

^{2,3} Pasante de la carrera de Ingeniero en Irrigación en la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México vicente.irrigacion.chapingo@gmail.com

⁴ Profesor investigador de la carrera de Ingeniero en Irrigación en la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México. aueiorey@yahoo.com.mx

5.2. Resumen

Los métodos geofísicos son aplicados para proporcionar información de la litología y estructuras geológicas del subsuelo, en este trabajo se emplearon técnicas de resistividad eléctrica tales como; sondeo eléctrico vertical (SEV) y tomografía geoelectrica (TG), con la finalidad de identificar zonas con propiedades acuíferas y susceptibles a la explotación, de agua subterránea. El área de estudio comprende aproximadamente 470 hectáreas, se realizaron en total ocho SEV de los cuales se identificaron tres sitios idóneos para realizar la perforación exploratoria, con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos de los SEV, se ejecutaron tres TG en las zonas detectadas como idóneas, se concluye que las posibilidades de contención de agua subterránea aparecen en las inmediaciones del SEV 4, 6, y 5. La interpretación de los datos se realizó por diferencias finitas aplicando software como IPIWIN, RES2DIV y AUTOCAD, cuya base de interpretación es la programación lineal y diferencias finitas.

Palabras clave—Prospección geofísica, exploración, agua subterránea.

.Tesis de Doctorado en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor : Ma. de Lourdes Vázquez Castro

Director : Dr. Mauricio Carrillo García

GEOPHYSICAL SURVEY IN CERRO COLORADO MUNICIPALITY OF ATOTONILCO EL GRANDE, STATE OF HIDALGO

M en I. A. Ma de Lourdes Vázquez Castro¹, Vicente de Jesús Vega Blancas², Ismael González
Fernández³ y Dr. Aurelio Reyes Ramírez⁴

¹IAUIA graduate student, Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, lourdesvc@msn.com (autor
corresponsal).

^{2,3} Irrigation engineer student, Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México

⁴ Research Professor, Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México. aueiorey@yahoo.com.mx

5.3. Abstract

Geophysical methods are applied to provide information on the lithology and geological structures of the subsoil, in this work electrical resistivity techniques such as vertical electrical sounding (VES) and geoelectric tomography (GT), it is to identify areas with aquifer properties and susceptible to the exploitation of groundwater. The study area comprises approximately 470 hectares, a total of eight VES were carried out, of which three suitable sites were identified for exploratory drilling, and so to corroborate the results obtained from the VES, three GT were executed in the areas detected as ideal, it is concluded that the possibilities of groundwater containment appear in the vicinity of VES 4, 6, and 5. The interpretation of the data was made by finite differences applying software such as IPIWIN, RES2DIV, and AUTOCAD, whose interpretation base is linear programming and finite differences

Keywords — Geophysical prospecting, exploration, groundwater

Doctoral thesis, Postgraduate in Agricultural Engineering and Integrated Use of Water,
Universidad Autónoma Chapingo.

Author : Ma. de Lourdes Vázquez Castro.

Advisor : Dr. Mauricio Carrillo García.

5.4. Introducción

El agua subterránea es un recurso natural muy importante para el desarrollo sostenible de una región, México vive del agua subterránea, prácticamente el 80% de su abastecimiento depende de esta, del total de la exploración del agua subterránea el 70% lo usan las unidades de riego, la importancia de conocer su presencia, distribución y uso en el país es indiscutible. La prospección geofísica eléctrica ha sido usada para la búsqueda de agua subterránea, la historia de su uso y aplicación rebasa los 100 años, a primera vista, se refiere a un conjunto de técnicas físicas y matemáticas, con la finalidad de realizar exploración del subsuelo para localizar yacimientos de materiales útiles (aguas subterráneas, petróleo, diversos minerales, carbón, entre otros). Los estudios de prospección eléctrica tipo resistivo se han orientado también para orientar excavaciones arqueológicas, detección de zonas saturadas de agua subterránea, a través de mediciones realizadas en la capa superficial de la Tierra. (Orellana, 1982). Los métodos geoeléctricos son utilizados en investigación hidrogeológica para obtener información de las propiedades del subsuelo, además juegan un papel clave para resolver problemas de localización y explotación del agua subterránea. Se han empleado técnicas que trabajan con una corriente continua, utilizando arreglos interelectródicos de cuatro o más electrodos que se instalan sobre el terreno en contacto eléctrico con el medio rocoso a estudiar, como en el caso de la TG que es multielectródica.

Se utilizan métodos de resistividad eléctrica para investigar las diferentes formaciones litológicas, su permeabilidad, estratigrafía de roca de lecho, la profundidad de la capa freática o la zona de formaciones saturadas, el espesor de las zonas meteorizadas, el establecimiento de sus profundidades, espesor y extensión lateral de los acuíferos, direcciones de flujo de aguas subterráneas, intrusiones de agua dulce y salada, zonas prospectivas de aguas subterráneas, entre otras aplicaciones (Kumar y Swathi, 2015). Las técnicas de prospección

geofísica-eléctrica detectan la resistividad aparente de los materiales del subsuelo, o lo que es la conductividad (su inverso). Algunas de estas técnicas son más modernas y precisas como la tomografía eléctrica, la cual es un método multielectrónico basado en la representación de modelo 2D y 3D de la resistividad del terreno aplicando de técnicas numéricas. Por otro lado, los sondeos eléctricos verticales (SEV), son considerados como métodos indirectos de exploración para la búsqueda de agua subterránea, siendo estos los más utilizados por su fácil interpretación y su rapidez en campo; sin embargo, presentan algunas dificultades debido a que se requieren ciertas características para un buen desarrollo, tales como; el espacio físico que se requiere, la topografía sea preferentemente plana, entre otros. El objetivo de este trabajo es aplicar técnicas geoeléctricas en la búsqueda de agua subterránea con equipo de sondeo eléctrico vertical y tomografía geoeléctrica, comparar los resultados de ambas técnicas y de esta manera determinar zonas en el subsuelo con propiedades acuíferas, en la región de Cerro Colorado.

5.5. Marco Físico

Localización y esquema geológico del área de estudio

Cerro Colorado, pertenece al municipio de Atotonilco el Grande, en el Estado de Hidalgo (Figura 43). Se localiza a 37 kilómetros de la capital del estado, Pachuca de Soto. Atotonilco el Grande colinda; con los municipios de San Agustín y Metzquitlán al norte, mientras que al este con el municipio de Huasca de Ocampo y el estado de Veracruz; al oeste con las localidades de Mineral del Chico, Actopan y Metzquitlán; al sur con Huasteca de Ocampo, Omitlán de Juárez y Mineral del Chico (INEGI 2010).



Figura 43. Ubicación del sitio de estudio localidad Cerro Colorado, Estado de Hidalgo (Fuente: Google earth, 2017).

La Formación Atotonilco El Grande, tiene una litología compuesta por rocas clásticas con un espesor aproximado de 165 m. Existe materiales formando conglomerados de arenisca, limonita y lutita con intercalaciones de piroclastos y cenizas volcánicas en El Paso y Santa María Amajac, Cubre mediante una discordancia angular las formaciones; El Abra, Soyatal, y a la secuencia volcánica del Grupo Pachuca. Está coronada por derrames basálticos y cenizas volcánicas (Arellano-Gil et al., 2005).

El Municipio de Atotonilco el Grande se encuentra en una zona topográficamente alta con una estructura geomorfológica representada por lomeríos bajos y cañadas hondas. Las pendientes son abruptas, varían en ambas cañadas que colindan con la cabecera municipal al Norte y Sur, cubriendo el 75% de la región, la altitud de esta zona varía entre 1800 a 2080 msnm. La fisiografía corresponde a la subprovincia de Llanuras y Sierras de Hidalgo y Querétaro en la Provincia del Eje Neovolcánico. La geología data de la era del Cenozoico, periodo terciario,

con presencia de roca ígnea extrusiva (basalto) en aproximadamente 60% de la superficie total del municipio.

5.6. Descripción del Método.

Materiales y Método de Estudio

Los valores de la resistividad del subsuelo, a diferentes profundidades, se miden con técnicas geofísicas eléctricas y electromagnéticas. El sondeo eléctrico vertical (SEV) y la tomografía geoelectrica (TG) siguen siendo las más importantes por ser herramientas ampliamente utilizadas por su sencillez y relativa economía.

Los estudios geoelectricos resistivos (SEV), sirven para obtener un perfil de la variación vertical de la resistividad, considerando que el suelo está compuesto por sustancias (minerales o electrolíticas) que pueden permitir el paso de la corriente, estos materiales pueden ser resistivos y conductores (Norzagaray, 2012). Mientras que la TG es un método multielectrónico que detecta valores de resistividad aparente del terreno logrando interpretarlos en imágenes representadas en dos dimensiones (2D) mediante el empleo de técnicas numéricas (diferencias o elementos finitos). El método de tomografía eléctrica de resistividades está en función de la disposición y tipo de arreglo de los electrodos en la superficie de la zona de estudio, con una separación condicionada por el grado de resolución, profundidad y área de estudio, el proceso de toma de datos está automatizado, lo que permite realizar un gran número de medidas, tanto en profundidad como lateralmente, en un espacio de tiempo relativamente corto (del orden de 750 medidas en dos horas), obteniéndose modelos 2-D de gran resolución.

Método geofísico con Sondeo eléctrico vertical. El primer método de prospección geofísica aplicado fue el método de resistividad eléctrica con técnicas de sondeo eléctrico vertical (SEV's). Se utilizó el equipo Terrameter

ABEM SAS-300B, el cual contiene tres unidades dentro de su carcasa; el transmisor, el receptor y el microprocesador, fue utilizado junto con diez electrodos metálicos, dos carretes de cables de conexión con una longitud de 60 m de hilo de 1 mm² para los electrodos de potencial, y dos carretes con cables de 750 m de hilo de 0.75 mm² para los electrodos de corriente, cinta métrica, mazo, entre otros accesorios. Se utilizó el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para determinar las coordenadas de cada punto del SEV, así como un formato para registrar la información de campo, se adoptó el arreglo Schlumberger para este estudio y la distancia entre los electrodos de potencial fue de 1m, 2.2 m, 10 m y 38 m y los electrodos de corriente se ampliaron hasta los 750 m por cada lado. Los datos de sondeo se presentaron como curvas de sondeo al relacionar la resistividad aparente frente a la mitad de la longitud de los electrodos en un papel doble-logarítmico. Se da este seguimiento debido a que antes de interpretar una curva cuantitativamente, se debe evaluar cualitativamente el número de capas y la nomenclatura del corte. La primera fase de la interpretación consiste en identificar el corte geoelectrico, formado por espesores y resistividades, esto se logró procesando la información en software; IPIWIN y AUTOCAD.

Método geofísico con tomografía geoelectrica de resistividades

La Tomografía geoelectrica es una técnica multielectrónica, el proceso de adquisición de datos logra obtener modelos 2-D de gran resolución. La colección de datos se realizó utilizando un resistivímetro Terrameter LS 300B, (2015), con espaciamiento entre electrodos de 5 m y longitud total de 210 m (42 electrodos en cada extremo del tendido), para detectar las variaciones de resistividad de las formaciones geológicas. La configuración de electrodos fue un arreglo tipo gradiente (Wenner Schlumberger). En campo se determinaron los valores de resistividad aparente, posteriormente se procesaron con el programa (Software) RES2DINV, generando imágenes de resistividad 2D. El programa de interpretación calcula la resistividad y la profundidad real del terreno utilizando

los procedimientos de cálculo de la Matriz Jacobiana y modelación hacia delante (Cosentino y Cosentino, 2000; D. M. Loke, 1999; M. H. Loke et al., 2013).

5.7. Presentación de Resultados y Discusión

El área de estudio comprende una superficie aproximada de 470 hectáreas, donde se ubica la localidad de Cerro Colorado, perteneciente al municipio de Atotonilco el Grande. Se realizaron ocho SEV's con arreglo Schlumberger y cuatro tomografías eléctricas con arreglo tipo gradiente, con el objetivo de determinar los mejores sitios de posible almacenamiento de agua subterránea, con base a la estructura interna del subsuelo.

Los sondeos eléctricos verticales tienen por objeto determinar la estratificación litológica y los espesores de los diferentes materiales del subsuelo en función de sus correspondientes valores de resistividad eléctrica, los resultados obtenidos en campo se presentan en el cuadro 5. De los SEV's ejecutados y su interpretación, se obtienen cuatro sitios de interés para este estudio, los cuales se ubican en las inmediaciones de los siguientes puntos:

SEV 4, se identifica el nivel freático alrededor de los 60 m. En los primeros 9.5 m, se determina material residual tobas arenosas y arcillosas, el espesor del siguiente estrato se localiza a los 100 m como brecha volcánica, tezontle y piroclastos.

SEV 6, se espera que el nivel freático se encuentre en los primeros 50 m, a los 90 m se identifica material tipo brecha volcánica, tezontle y piroclastos.

SEV 7, se espera que el nivel freático se localice en los primeros 50 m determinando en los primeros 8 m material residual tobas arenosas y arcillosas, después, a los 132 m, material tipo coladas de roca basáltica fracturada y escoria volcánica.

Cuadro 6. Resultados de los Sondeos Eléctricos Verticales.

SEV	Numero de capas	Espeso (m)r	Profundidad (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	0.85	0.85	21.86
	2	12.19	13.40	4.39
	3	&	&	176.67
2	1	0.54	0.54	22.56
	2	1.10	1.64	1.08
	3	&	&	105.88
3	1	4.14	4.14	30.59
	.2	68.23	72.37	87.51
	3	. &	&	20.80
4	1	6.34	6.34	8.14
	2	50.95	57.29	49.28
	3	&	&	29.22
5	1	4.87	4.87	3.39
	2	7.78	12.65	0.86
	3	140.72	153.37	16.38
	4	&	&	32388
6	1	14.51	14.51	35.24
	2	6.1	20.61	12.63
	3	112.39	132.9	67.63
	4	82.46	215.36	74.41
	5	&	&	21.04
7	1	5.63	5.63	6.15
	2	129.35	134.98	63.89
	3	283.97	418.95	7.63
	4	&	&	1132.65
8	1	9.29	9.29	11.98
	2	11.88	21.17	26.72
	3	&	&	75684

Nota. &. Representa el espesor y profundidad indefinido, por ser el último valor detectado.

SEV 5, se espera que el nivel freático se encuentre en los primeros 50 m, identificando en los primeros 8 metros material residual tobas arenosas y arcillosas, después, a los 152 metros, material tipo volcanoclásticos, tobas arenarcillosas, asociados a una falla inversa (zonas de cizalla).

La interpretación de los SEV, así como las características físicas observadas en la zona, permitió identificar cinco secciones para realizar cortes longitudinales entre los sondeos (Figura 44), esto con el fin de establecer el perfil geológico y realizar las comparaciones pertinentes con la tomografía geoelectrónica.

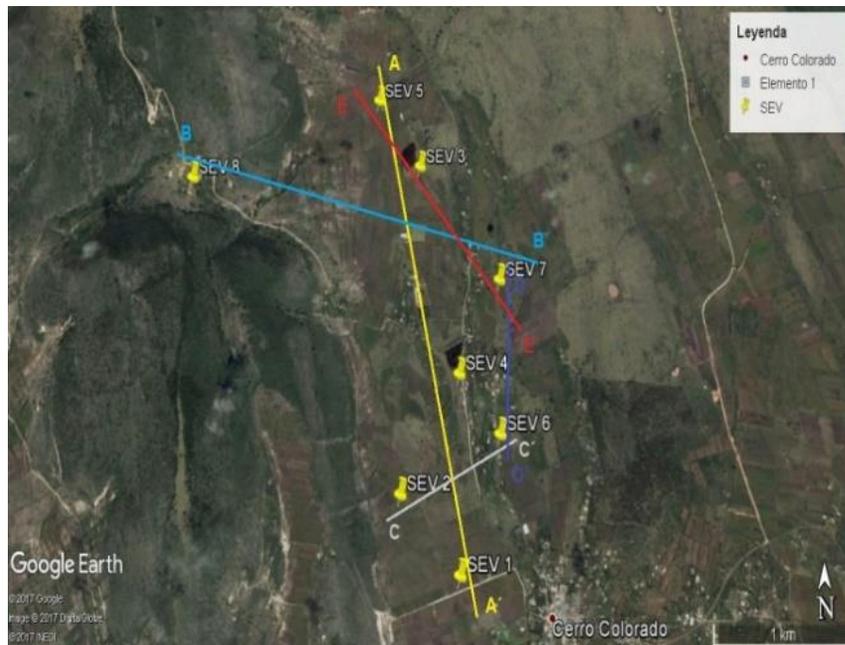


Figura 44. Cortes de perfiles en Cerro Colorado, Estado de Hidalgo.

Perfil Geoelectrónico AA'. Con una profundidad de 160 m, orientado Norte-Sur, se identifican seis estratos litológicos, el primero de material residual y suelos altamente arcillosos, su espesor varía de 13 a 14 m en las inmediaciones del SEV 1 y se acuña hacia el SEV 4, sus características son de impermeabilidad. El segundo estrato corresponde a materiales volcanoclásticos, permeables,

mientras que en las inmediaciones del SEV4 varia su espesor de los 5 a los 60 m de profundidad. En el SEV 3 y 5 existen materiales volcanoclásticos semi-permeables, asociados a la falla inversa que ocurre cerca del SEV 5, dando origen de la salida de agua piezométrica en forma de manantial. A una profundidad de 100 m se localizan rocas carbonatadas tipo caliza y lutitas interestratificadas (Figura 45). Dos lugares se reconocen que pueden ser explorados en este perfil, en las inmediaciones del SEV 4 a una profundidad de 120 m y en las inmediaciones del SEV 5 a una profundidad de 140 m.

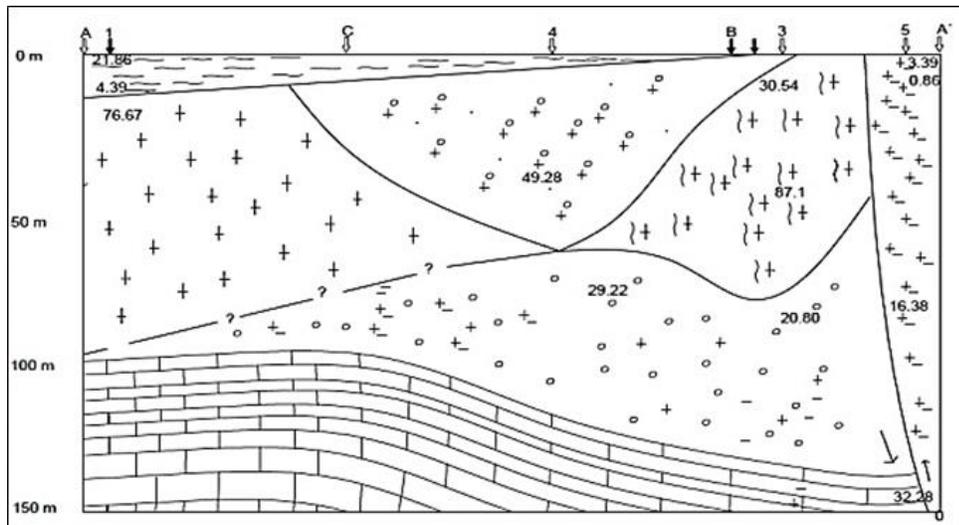


Figura 45. Perfil geoelectrico AA' (SEV 1, 4, 3, 5).

Perfil Geoelectrico BB'. Corte a profundidad de 160 m, orientado Oeste-Este, describe cinco paquetes litológicos, el primero de material residual, suelo arcilloso e impermeable, ocurre en las inmediaciones del SEV 8 y SEV 7 (Figura 46).

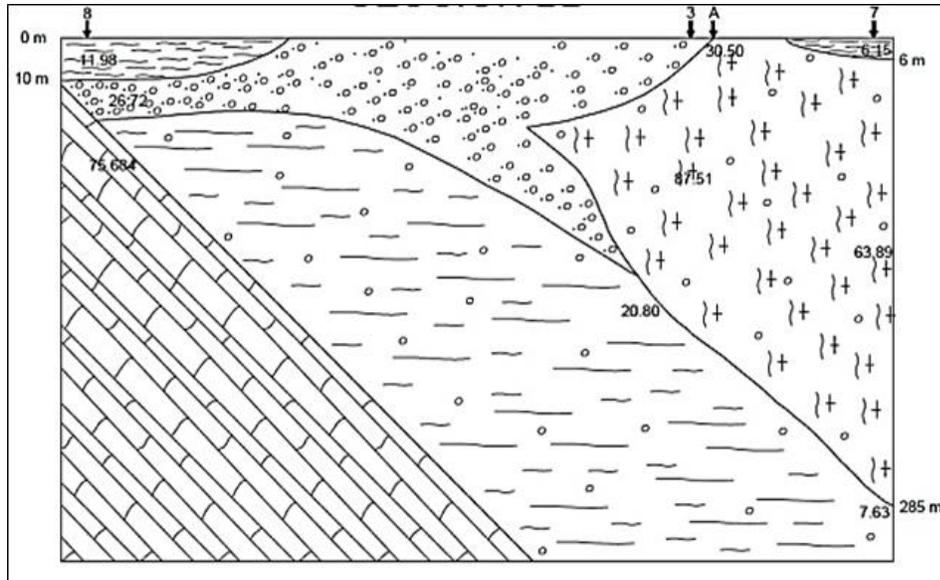


Figura 46. Perfil geoelectrico BB' (SEV 8, 3 y 7).

El segundo estrato, es relleno aluvial y permeable, se acuña hacia la montaña, es decir con dirección al SEV 8, presenta un espesor de 12 a 60 m, si estuviera saturado podría ser útil para construir norias o pozos poco profundos. El estrato tres se asocia a rocas ígneas fracturadas, coladas de lava fracturada y semi permeables, el espesor mayor ocurre en las inmediaciones del SEV 7, puede ser considerado como acuífero, aunque de baja productividad. El estrato cuatro se asocia a materiales volcanoclásticos y tobas arcillosas, semi permeables, con espesor mayor a 150 m. El último estrato de espesor se asocia a rocas carbonatadas, calizas de la Formación Cuesta del Cura del Cretácico Superior, dada su interestratificación con lutitas, se considera impermeable y basamento del acuífero.

Perfil Geoelectrico CC'. Este perfil describe 160 m de profundidad, se ubica en la parte alta de la microcuenca, en una orientación Este-Oeste, se interpretaron cinco estratos, el primero de ellos de 10 m de profundidad, se asocia a material residual y suelo arcilloso e impermeable (Figura 47). El segundo estrato de 30 m

de espesor se asocia a rocas volcanoclásticas permeables, le subyace otros materiales volcanoclásticos mayormente arcillosos de unos 20 m de espesor y subyaciendo a este vuelve a ocurrir los volcanoclásticos permeables. También están presentes rocas ígneas fracturadas, coladas de lava de unos 50 m de espesor e impermeables, estas ocurren en las cercanías del SEV2. El último estrato se asocia a rocas carbonatadas, calizas y lutitas de la formación Cuesta del Cura, del Cretácico Superior e impermeables. En las inmediaciones del SEV 6 es posible realizar una perforación exploratoria a los 90 m de profundidad.

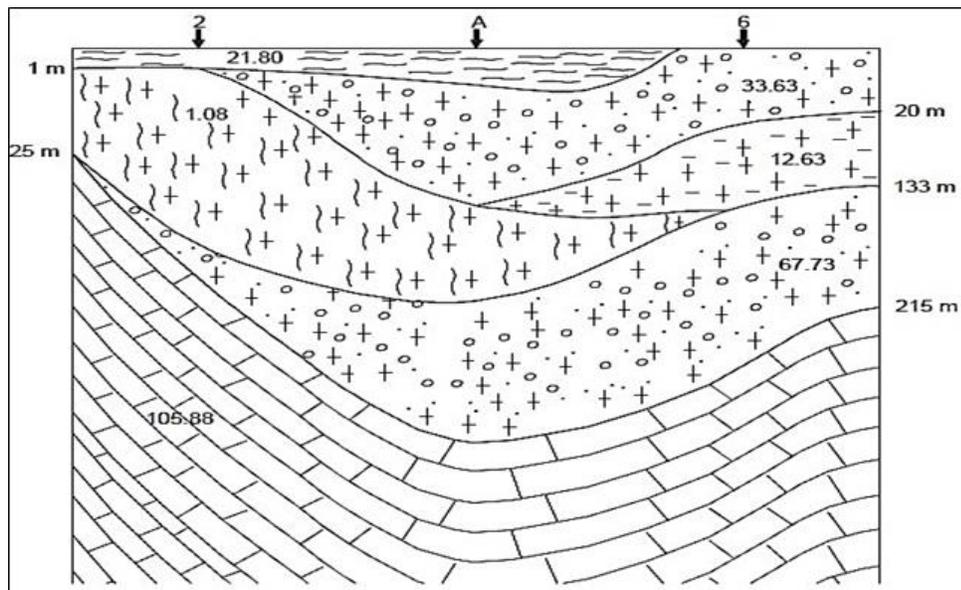


Figura 47. Perfil geoelectrico CC' (SEV 2 y 6).

Perfil Geoelectrico DD'. Perfil de 280 m, orientado Norte-Sur, describe cinco paquetes litológicos, el primer estrato con un espesor de 14 m se asocia a brechas volcánicas permeables. Posteriormente una capa de tobas arcillosas impermeables y material volcanoclásticos que van desde cenizas, brechas y tezontle permeable, cubren un espesor considerable que va de 120 m a 200 m, le sigue una capa de toba arcillosa poco permeable de un espesor de 150 m más marcado en el lado del SEV 7 y finalmente se encuentra una capa que se asocia

al contacto entre las rocas ígneas y rocas sedimentarias cretácicas, impermeable. Se aprecia al igual que en el perfil anterior; que en las inmediaciones del SEV 6 es posible realizar una perforación exploratoria a los 90 m de profundidad (Figura 48).

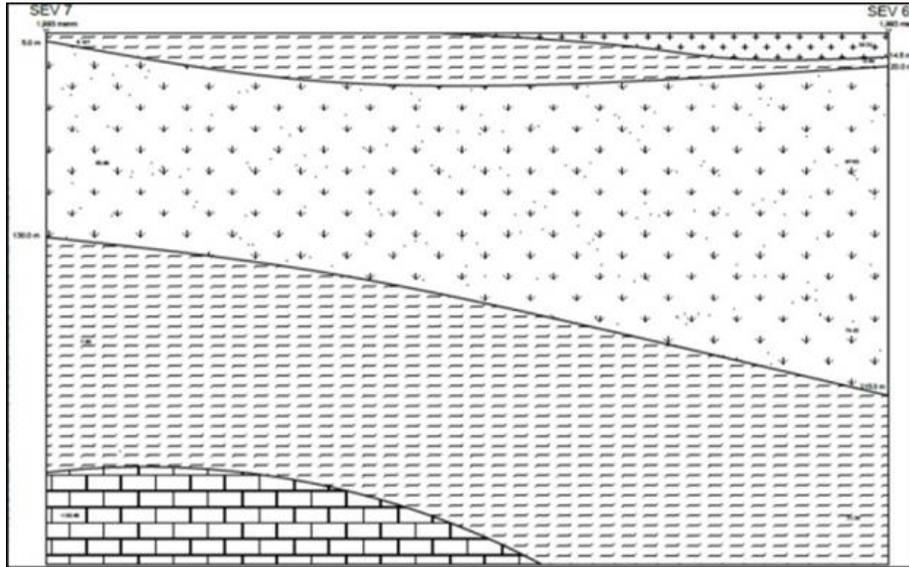


Figura 48. Perfil geoelectrico DD' (SEV 7 y 6).

A partir del procesamiento de los datos de las tomografías realizadas en la zona de estudio, se generaron cuatro perfiles de resistividad. La interpretación de las secciones geoelectricas se realizó en términos de rangos de resistividad asociándolos a los materiales presentes en la zona de estudio, de tal manera que puedan compararse con los perfiles obtenidos en los SEV's y teniendo como objetivo encontrar los materiales con alteración por la acción del agua contenida, así como roca fracturada o alterada.

Perfil 1. Este perfil corresponde al punto del SEV 3, en una orientación NO-SE, debido a variaciones en la medición de resistividad, por factores externos en el

medio físico, por lo que se analizó el procedimiento para minimizar estas variaciones.

Perfil 2. Este perfil corresponde al punto del SEV 5, en una orientación O-NE. En los primeros 10 m se presenta un suelo arcilloso con poca resistividad e impermeable, posteriormente una capa ligera de boleos de arena y arcilla, en la parte Oeste se presenta material tipo aluvi3n; gravas, arenas, tobas limoarcillosas permeables, al fondo del perfil tobas arenosas, aluvi3n, dep3sitos volc3nicos permeables de mediana productividad (Figura 49).

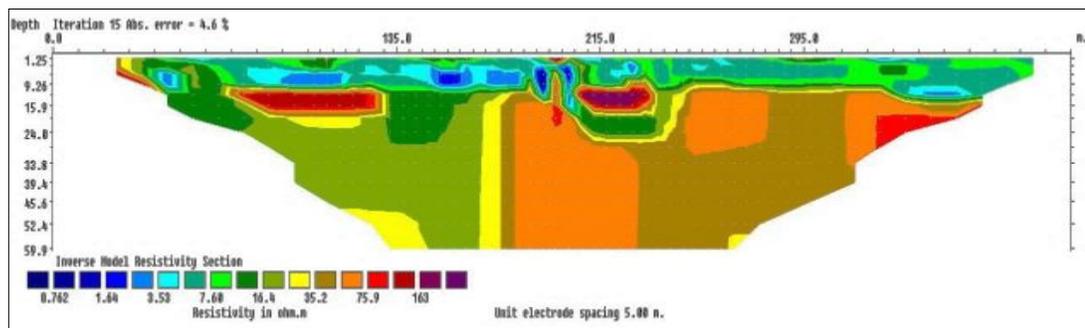


Figura 49. Perfil 2 de tomografía geoelectrica.

Perfil 3. Este perfil corresponde al punto del SEV 6, en una orientación N-S. El primer estrato, se asocia a brecha volcánica en la parte norte y un poco más arcilloso en la parte sur del perfil, en los primeros 20 metros se considera permeable, en la parte central se presenta material tipo tobas arenosas semipermeable y en la mayoría del perfil se identificó un estrato que pertenece a material volcanoclástico, tipo tobas arenosas y lavas porosas, permeables (Figura 50).

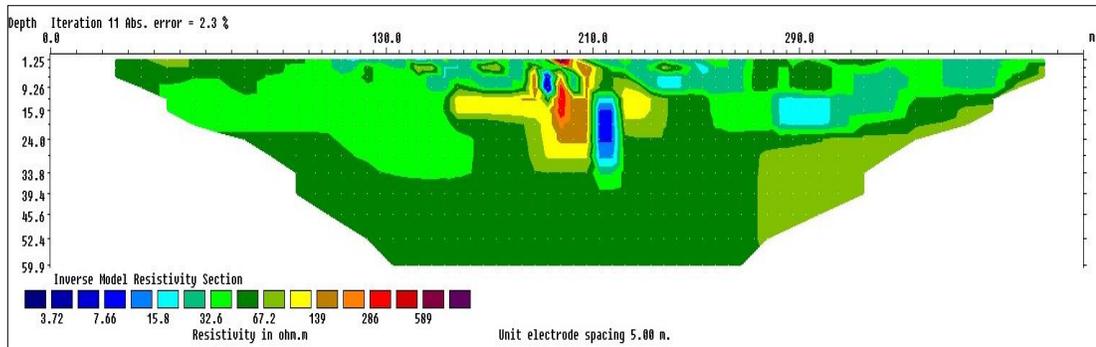


Figura 50. Perfil 3 de tomografía geoelectrica.

Perfil 4. Corresponde al punto del SEV 7, en una orientación N-S en esta medición se hizo una variante con respecto a la profundidad de estudio, esto solo permitió una ampliación de la sección, sin logara penetrar mayor profundidad en el subsuelo de manera real.

5.8. Comentarios Finales

La prospección geoelectrica realizada, en Cerro Colorado, Municipio de Atotonilco El Grande, Estado de Hidalgo, permitió comparar métodos de prospección geoelectrica como; el SEV y la TG.

El SEV es el método que permitió identificar zonas con posibilidades acuíferas a mayor profundidad, mientras con la TG, se identificaron estratos a profundidades menores a 60 m, por lo que el método con mayor utilidad para la exploración de agua subterránea es el SEV, debido a que los niveles freáticos y piezométricos están por debajo de los 80 metros en acuíferos del centro del país, mientras que en el norte llegan a profundidades mayores a los 150 m. Con respecto a la parametrización, desafortunadamente por la poca profundidad de exploración del equipo de tomografía geoelectrica, solo se pudo identificar los primeros 56 metros y hacer la comparación con el corte litológico conocido, sin embargo, haciendo el

análisis en esos metros se pudo constatar que coinciden las lecturas del tomógrafo con respecto a los materiales que se tienen en el corte, por lo tanto, los resultados de la tomografía geoeléctrica son confiables.

Respecto a la zona estudiada, se concluye que las zonas con posibilidades acuíferas en la comunidad de Cerro Colorado, se ubican en las inmediaciones de los SEV 4, 6, 7 y 5, ordenados de mayor a menor con respecto a su posibilidad acuífera, donde de acuerdo a los perfiles geoeléctricos, el nivel freático se tiene aproximadamente a los 50 metros, sitios en los cuales, se hace una propuesta de perforación exploratoria para posteriormente hacer la realización de un pozo de agua para uso doméstico, esta propuesta permitirá subsanar el problema de desabasto de agua que presenta la región.

El método de TG es un método innovador para la exploración de agua subterránea, por lo que se debe continuar implementando técnicas y arreglos para el uso eficiente del equipo, así como la obtención de datos confiables a profundidades mayores a 60 m, debido a que los acuíferos en México rebasan esta profundidad.

5.9. Literatura Citada

Arellano-Gil, J., Velasco-de León, P., Silva-Pineda, A., Salvador-Flores, R., y Beltrán-Romero, F. (2005). Origen y características geológicas del paleo-Lago de Amajac, Hidalgo. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 22(2), 199–211. México. Consultado en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742005000200199&lng=es&tlng=es.

Cosentino, P. L. (2000). Approaching electrical tomography. *Annals of Geophysics*, 43(6), 1131-1146. Consultado en <https://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/issue/view/270>

INEGI. (2010). México en cifras. información nacional, por entidad federativa y municipios. Consultado en <http://www.inegi.org.mx/>

Kazakis, N., Vargemezis, G., y Voudouris, K. S. (2016). Estimation of hydraulic parameters in a complex porous aquifer system using geoelectrical methods. *Science of the Total Environment*, 550, 742–750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.133>

Kumar, M. R. S. S., y Swathi, G. (2015). Evaluation of Heterogeneous Aquifers in Crystalline Rocks from Resistivity Sounding Data In and Around Kanigiri, Prakasam District, Andhra Pradesh, India. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)*, 4(6), 56–62.

Loke, D. M. (1999). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2D and 3D Surveys*. Cangkat Minden Lorong 6, Minden Heights, 1170 Penang, Malaysia (mhokec.jaring.my) Consultado en https://www.academia.edu/11991713/Electrical_imaging_surveys_for_environmental_and_engineering_studies_A_practical_guide_to_2_D_and_3_D_surveys

Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D., Kuras, O., & Wilkinson, P. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 95, 135-156. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.017>

Loke, M. H., y Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44(1), 131–152. DOI. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>

Norzagaray, M., Muñoz-Sevilla, P., García-Gutiérrez, C. (2012). Diseño Y Aplicación De Un Equipo Para El Monitoreo De La Salinidad en el Subsuelo. Ra Ximhai. *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*. Universidad Autónoma Indígena de México, 8(3), 143-147. Consultado en: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rxm/issue/view/4210>

Orellana, E. 1982. *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua*. 2da ed. Ed Madrid: Parafinfo.

6. CONCLUSIONES GENERALES

El acuífero de Texcoco se localiza en la porción central de la Subprovincia Fisiográfica Lagos y Volcanes, con una superficie de aproximadamente 934 Km². Abastece de agua a casi 3,200,000 habitantes de la zona oriente del Valle de México, colocándolo como uno de los acuíferos más sobreexplotados del estado de México.

La región del acuífero de Texcoco es una zona agrícola-ganadera-industrial, el agua subterránea es la fuente principal de abastecimiento de agua potable. El incremento de la población y el desarrollo industrial, en la zona del acuífero de Texcoco, ha generado una demanda significativa en el consumo de agua y como consecuencia el aumento en los volúmenes de extracción, ocasionado el desequilibrio del sistema hidrológico. Lo que justifica la realización de estudios tendientes a conocer el grado de protección y vulnerabilidad que el sistema acuífero presenta ante fuentes de contaminación natural y/o antropogénica.

Algunos de los parámetros importantes a utilizar con los métodos de vulnerabilidad intrínseca son la conductividad hidráulica y el espesor de los estratos subyacentes al acuífero. Por lo que para obtenerlos se utilizaron métodos de determinación de infiltración básica y conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}), así como técnicas geofísicas eléctricas resistivas (SEV y TER) y análisis fisicoquímicos en zonas de recarga y pozos de agua. La aplicación de diferentes técnicas medidas en campo para la obtención de parámetros hidráulicos (K_{fs}), así como los estudios geoelectricos apoyados en datos de pozos disponibles para su interpretación, proporcionan información que

permite caracterizar el área de estudio. Estos métodos indirectos demuestran utilidad en los estudios de evaluación de vulnerabilidad.

Los estudios realizados para determinar la K_{fs} presentaron rangos de variación entre cada una de las metodologías aplicadas; datos en campo de infiltración base (0.06 a 11.14 $m \cdot d^{-1}$); método de Kostiaikov (0.025 a 7.61 $m \cdot d^{-1}$), Horton (0.029 a 3.90 $m \cdot d^{-1}$), y de carga constante por permeámetro de Guelph (0.014 a 1.98 $m \cdot d^{-1}$). Los valores de K_{fs} menores se obtuvieron por la técnica del permeámetro de Guelph, esto debido a que la metodología considera en los cálculos factores como; tipo de suelo y estructura, por lo que no todo el volumen infiltrado discurre en dirección vertical, sino que también considera la velocidad del flujo en dirección lateral.

En general, los valores con mayor rango de permeabilidad, de cada metodología aplicada, inciden en localizar la zona con mayor capacidad de infiltración al norte y noreste del acuífero, donde se localizan materiales tipo andesita y basalto, producto de los eventos volcánicos del cuaternario y en las inmediaciones del cerro Las Promesas y el monte Tláloc (zona oriente del acuífero). Mientras que la zona con menor capacidad de infiltración se localiza al poniente del acuífero, en la zona lacustre del valle de Texcoco y algunas zonas puntuales donde la poblacional ha ocupado espacios, compactando y realizando edificaciones.

Los estudios geoelectrónicos resistivos realizados en la zona, permitieron identificar los estratos y litología de la zona del acuífero (también se corroboró la información con litología de pozos existentes, en la zona), logrando identificar zonas con presencia de materiales que permiten el tránsito de agua hacia el acuífero, así como la zona saturada del mismo. Los datos de los estudios geoelectrónicos se utilizaron para calcular la conductancia longitudinal unitaria, S (Siemens) la cual clasifiqué al acuífero con una capacidad protectora de pobre a moderada en la zona centro y oriente (< 5 Siemens), mientras que la zona

poniente y norte del acuífero presenta una capacidad protectora de muy buena a excelente (50 a 70 Siemens).

Esta técnica ayudó a evaluar la capa protectora del acuífero, sobre todo en las zonas que presentaron permeabilidad de moderada a alta. De esta manera se identificó que el fluido infiltrado, a través de la capa superior del suelo, puede llegar a la zona saturada del acuífero.

Con la información del espesor de las capas de la zona no saturada, el nivel del agua y los valores de la conductividad hidráulica de cada capa, se elaboró el mapa AVI, indicando que el área de estudio presenta una vulnerabilidad de baja a moderadamente alta (1.4 a 3.9 días). Las zonas identificadas con vulnerabilidad alta a moderadamente alta se localizan en la parte central y oriente del acuífero.

Finalmente, se logró evaluar el riesgo de contaminación, que presenta el acuífero de Texcoco aplicando el método AVI y los parámetros de Dar Zarrouk, determinando que el acuífero presenta vulnerabilidad a la contaminación de fuentes puntuales y difusas, categorizándolo con vulnerabilidad de alta a moderadamente alta, ubicando las zonas de mayor riesgo en la porción oriente y sureste (inmediaciones de la Sierra de Río Frío), así como zonas puntuales en el centro y norte del acuífero. Se debe tener especial cuidado en la zona oriente ya que esta identificada como zona de recarga del acuífero.

Y aunque, el acuífero presenta un estrato arcilloso, en su cobertura superior, que le confiere cierta capacidad protectora (zona centro y poniente), no ha sido suficiente. Este se demuestra en los estudios geoelectrónicos (SEV y TER), realizados, así como en las pruebas de infiltración y conductividad hidráulica saturada (K_{fs}). La zona lacustre alrededor del lago Nabor Carrillo, presenta una cobertura superficial arcillosa (con un menor tiempo de tránsito) debido a la presencia de una falla estructural que permite el paso de infiltraciones hacia la zona saturada del acuífero.

Con respecto al agua potable extraída del acuífero, se detectaron niveles de Sólidos Disueltos Totales (SDT), muy cercanos al límite máximo permisible, en agua proveniente de los pozos Ramal-Textcoco, ($940 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en análisis fisicoquímicos realizados por CONAGUA 2017. Mientras que muestras tomadas en la porción centro del acuífero de pozos de agua potable y pozos profundos en los Reyes la Paz (zona suroeste del acuífero), se determinaron valores de SDT entre 250 a $680 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Los valores menores corresponden a la porción oriente y sur del acuífero, mientras la mayor cantidad de SDT se localizó en los pozos (someros) del centro y oriente del acuífero de Textcoco.

Es relevante aplicar otros métodos de valoración (GOD, DRASTIC, SINTACS), para comparar los distintos grados del riesgo y vulnerabilidad a la contaminación que presenta el acuífero de Textcoco, debido a que, al ser considerado un acuífero multicapa, presenta variaciones en la determinación de sus parámetros hidráulicos. De esta manera, se logrará generar una herramienta para la planificación de actividades socioeconómicas y el ordenamiento territorial, con la finalidad de desarrollar políticas de gestión y protección del acuífero para prevenir la contaminación del agua subterránea y así lograr el aprovechamiento adecuado del mismo.

ANEXO A. Nivel piezométrico de pozos (CONAGUA; 2017)

IDPOZO	DIRECCIÓN	X_UTM	Y_UTM	Elevación seleccionada para configurar msnm	Profundidad de nivel de agua 2000	Elevación del nivel de agua (2000)	Profundidad de nivel de agua 2017	Elevación del nivel de agua (2017)	Factor de correlacion (Person)
.58-A	Pueblo Texcoco Municipio Texcoco	511231	2158714	2244	51.08	2192.9	70.66	*2173.33	0.9788
.98-B	Cabecera Municipal Mpio. Chimalhuacán	506489	2145907	2235	52.55	2182.5	74.71	2160.3	
BO-37V	Calle Emiliano Zapata s/n Col. Lomas de San Juan Mpio. Texcoco	515860	2154870	2352	142.08	2209.9	130.62	2221.4	
B-155V	Parcela 146 de Margarita de la Sosa Ejido San Francisco Acozac Mpio. San Salvador Atenco	506938	2161976	2253	49.73	2203.3	71.11	2181.9	
B-273V	Ejido de Acolman Pueblo Tepepan Mpio. Acolman	507830	2166924	2244	43.11	2200.9	61.58	2182.4	
B-465V	Pueblo San Cristobal Nexquipayac Mpio. San Salvador Atenco	505961	2163726	2243	49.70	2193.3	72.19	2170.8	
B-497V	Calles 27 de Septiembre y Florida Pueblo San Salvador Atenco Mpio. San Salvador Atenco	508783	2161714	2245	51.39	2193.6	71.89	2173.1	
C-953V	Carretera Texcoco-San Andrés Chiautla Pueblo Santa Catarina Mpio. San Andrés Chiautla	512686	2160290	2252	42.97	2209.0	51.47	2200.5	
CO-771	Calle Embarcadero No. 24-A Barrio Villa Xochitengo Mpio. Chimalhuacán	503381	2147292	2241	41.00	2200.0	*65.43	2175.6	0.9581
CO-34	Escuela # 172 "Mariano Azuela", Calle de San Agustín Calvario s/n, Pbo. San Agustín Atlapulco	504195	2143683	2239	29.11	2209.9	32.04	2207.0	
D-868	Poblado Santiago Cuautlalpan Mpio. Texcoco	511146	2148940	2251	60.72	2190.3	85.56	2165.4	
DO-35	Carr. Texcoco-Veracruz Pueblo Santa Inés Mpio. Tepetlaotoc	520159	2161604	2371	93.03	2278.0	101.25	2269.8	
EA-47	Plaza Principal Calle Hidalgo Pueblo Santa Isabel Ixtapan Mpio. San Salvador Atenco	505668	2165526	2242	49.19	2192.8	*73.03	2169.0	0.9879
EA-69	Calle 16 de Septiembre y Morelos Pueblo San Simón Mpio. Texcoco	514070	2159991	2257	55.00	2202.0	*75.43	2181.6	0.9933
EA-82V	Pueblo Los Reyes San Salvador junto al Río Jalapango Mpio. Texcoco	515788	2161123	2272	58.24	2213.8	35.52	2236.5	
EB-15	Pueblo San Simón Mpio. Texcoco	514299	2160088	2258	55.18	2202.8	73.87	2184.1	
EB-11	Caminoa a Pentecostes-San Andrés Chiautla Mpio. San Andrés Chiautla	513227	2161552	2253	50.92	2202.1	70.02	2183.0	
EC-35	Carr. Texcoco-Tepexpan junto al Río Papalotla Mpio. Villa Tezoyuca	508743	2164656	2254	42.82	2211.2	59.58	2194.4	
EC-36	Carr. Texcoco-Tepexpan junto al Río Papalotla Mpio. San Salvador Atenco	508241	2164156	2247	41.59	2205.4	*73.44	2173.6	0.9684
ED-12	Camino a Chiautla, junto al Río Jalapango pueblo San Andrés Chiautla Mpio. San Andrés Ch.	512356	2160643	2251	51.57	2199.4	69.03	2182.0	
EI-18	Carr. México-Veracruz Vía Apizaco km 45+900 Mpio. Texcoco	516804	2159534	2275	49.35	2225.7	88.93	2186.1	
EI-20	Carr. Federal México-Federal Vía Apizaco junto al Río San Joaquín Mpio. Texcoco	517369	2160384	2285	48.41	2236.6	49.82	2235.2	
EI-51V	Calle Altija No. 2 Barrio Tepetlapa Pueblo Tepetlaotoc Mpio. Tepetlaotoc	518650	2163988	2292	46.77	2245.2	53.88	2238.1	
EI-72	Calle Buenavista Barrio de la Asunción Pueblo Tepetlaotoc Mpio. Tepetlaotoc	518830	2164447	2293	28.79	2264.2	35.88	2257.1	
EI-86	Carr. México-Veracruz km 47+500 cerca de la planta de CFE Mpio. Texcoco	517603	2160466	2280	49.35	2230.7	45.20	2234.8	
EK-54	Calle Tlaxcantla No. 6 Barrio San Sebastian Poblado Tepetlaotoc Mpio. Tepetlaotoc	519085	2164481	2295	30.05	2265.0	*36.03	2259.0	0.9270
EK-62	Calle Morelos Esq. Fco. I Madero Pueblo La Resurrección Mpio. Texcoco	514946	2159566	2262	62.12	2199.9	*81.57	2180.4	0.9964
EL-03	Av. Juárez s/n Pueblo Concepción Jolapa Mpio.	516252	2165441	2282	57.06	2224.9	*74.07	2207.9	0.9808
EL-84	Pueblo Los Reyes San Salvador Mpio. Texcoco	515507	2160768	2297	58.59	2238.4	*77.98	2219.0	0.9870
EL-87V	Calle Morelos No. 12 Pueblo Papalotla	515421	2162547	2263	51.06	2211.9	66.67	2196.3	
EM-03	Calle Allende s/n Pueblo Papalotla Mpio Papalotla	514170	2162998	2258	51.29	2206.7	64.00	2194.0	
EM-74	Pueblo Papalotla Mpio. Papalotla	516352	2163662	2275	57.14	2217.9	74.75	2200.3	
EM-92	Calle Tlaxcantla y Tlalpuca plaza principal Hidalgo, Pueblo Tepetlaotoc Mpio. Tepetlaotoc	518926	2164058	2293	*45.10	2247.9	57.59	2235.4	0.9729
EN-58	Calle Hidalgo No 9 Pueblo Santa Cruz de Arriba Mpio. Texcoco	513801	2158046	2258	58.60	2199.4	*77.65	2180.3	0.9937
EN-83	Carr. Texcoco-Chinoncuac km 2+000 Mpio. Texcoco	511442	2158767	2246	52.36	2193.6	72.06	2173.9	
EN-97	Calle Flores Magón s/n Col. Niños Heroes Pueblo Texcoco Mpio. Texcoco	511506	2157613	2244	50.40	2193.6	*69.87	2174.1	0.9841
EO-20V	Calle Niolás Romero Pueblo Texcoco Mpio. Texcoco	512999	2156719	2265	56.22	2208.8	75.75	2189.3	
EO-53	Carr. Texcoco a Tepepan km 2+000 Pueblo Texcoco Mpio. Texcoco	513268	2158986	2255	55.12	2199.9	*77.43	2177.6	0.9898

IDPOZO	DIRECCIÓN	X_UTM	Y_UTM	Elevación seleccionada para configurar msnm	Profundidad de nivel de agua 2000	Elevación del nivel de agua (2000)	Profundidad de nivel de agua 2017	Elevación del nivel de agua (2017)	Factor de correlacion (Person)
EP-38	Pueblo San Diego Mpio. Texcoco	514273	2156651	2287	78.09	2208.9	*94.89	2192.1	0.9848
EP-47V	Calle Francisco Dosamantes s/n Col. Lomas de San Juan Pueblo Huexotla Mpio. Texcoco	514051	2154378	2295	*93.6	2201.4	*112.12	2182.9	0.9953
EP-55V	Carr. Federal México-Texcoco km 35+500 Mpio. Texcoco	511765	2153340	2253	53.50	2199.5	74.19	2178.8	
EP-87	Carr. Los Reyes-Lechería km 2+000 Pueblo Texcoco Mpio. Texcoco	510721	2159609	2245	52.10	2192.9	70.39	2174.6	
ER-14	Pueblo San Bernardino Mpio. Texcoco	511021	2152754	2248	47.57	2200.4	70.61	2177.4	
ER-26V	Calle centenario No. 4 Pueblo Montecillo Mpio. Texcoco	509692	2150985	2245	48.92	2196.1	72.46	2172.5	
ER-27V	Carr. México-Texcoco km 34+600 Terrenos de Chapingo Mpio. Texcoco	510843	2152323	2245	46.80	2198.2	69.98	2175.0	
ER-87V	Pueblo San Mateo Huexotla a 150 m de la iglesia por el lado norte Mpio. Texcoco	512431	2153896	2252	60.40	2191.6	80.33	2171.7	
ER-88	Frac. Chapingo junto a Huexotla entrada por la cooperativa Pueblo Texcoco Mpio. Texcoco	513050	2154210	2265	67.46	2197.5	86.42	2178.6	
ER-96	Carr. México-Texcoco km 34+000 Pueblo Coatlínchan Mpio. Texcoco	512131	2151504	2260	58.98	2201.0	72.39	2187.6	
ES-05V	Av. Morelos No. 25 Pueblo San Miguel Coatlínchan Mpio. Texcoco	513344	2150127	2296	83.12	2212.9	110.37	2185.6	
ES-07	Carr. México-Texcoco km 33+500 Pueblo Coatlínchan Mpio. Texcoco	511957	2150195	2265	76.51	2188.5	99.84	2165.2	
ES-65	Carr México-Texcoco km 33+500 Pueblo Montecillo Mpio. Texcoco	510452	2150806	2253	53.81	2199.2	*74.58	2178.4	0.9969
ES-85	Carr México-Texcoco km 33+500 Pueblo Coatlínchan Mpio. Texcoco	512348	2151054	2263	73.44	2189.6	*91.41	2171.6	0.9925
ES-98	Carr México-Texcoco km 32+500 Pueblo Coatlínchan Mpio. Texcoco	511992	2149282	2265	72.19	2192.8	*90.78	2174.2	0.9775
ES-99	Carr México-Texcoco km 32+500 Pueblo Coatlínchan Mpio. Texcoco	513005	2149487	2281	86.13	2194.9	107.99	2173.0	
ET-04	Carr. México-Texcoco km 32+500 junto al Río Mpio. Texcoco	510625	2149985	2258	61.45	2196.6	*78.46	2179.5	0.9885
ET-75	Carr. México-Texcoco km 31+500, Rancho El Jardín, Pueblo Coautlalpan, Mpio. Texcoco	508083	2150621	2238	38.90	2199.1	45.05	2193.0	0.9526
ET-77V	Carr. México-Texcoco km 31+500 Pueblo Coautlalpan Mpio. Texcoco	508333	2149284	2249	43.01	2206.0	67.18	2181.8	
EW-39	Escuela Chapingo, Campo Experimenta,l Pueblo Texcoco, Mpio. Texcoco	511100	2154062	2250	48.12	2201.9	*66.59	2183.4	0.9865
EW-55	Río Chapingo Puente de Guadalupe Pueblo Netzahualcoyotl Mpio. Texcoco	508889	2154433	2243	43.13	2199.9	*64.79	2178.2	0.9841
EK-07V	Texcoco, Municipio de Texcoco	510853	2155517	2247	Sin registro anterior a la fecha		66.65	2180.4	
E-40V	San Salvador Atenco-Tezoyuca	511070	2170039	2255	Sin registro anterior a la fecha		*74.24	2180.8	
E-44V	Pueblo de Chiltepēc Mpio. Acolman	511068	2170050	2273	51.78	2221.2	72.69	2200.3	
E-133	Pueblo san Nicolás Tlaminca Mpio. Texcoco	518979	2156089	2392	101.71	2290.3	120.67	2271.3	
E-347	Calle Miguel Hidalgo y General Emiliano Zapata Pueblo de Acolman Mpio. Acolman	509410	2171218	2255	46.30	2208.7	*63.14	2191.9	0.9710
E-607V	Ejido Santiago Chimalpa, Pueblo Santiago Chimalpa Mpio. San Andrés Chiautla	512443	2163648	2255	53.32	2201.7	*71.92	2183.1	0.9852
E-708V	Camino ejidal junto al río Jalapango Pueblo Pentecostes Mpio. Texcoco	514453	2160919	2257	56.81	2200.2	74.13	2182.9	
E-866	Calle 2 de Marzo s/n esquina con Av. del Trabajo Mpio. Sta. Maria Chiconcuac	511392	2162543	2248	44.37	2203.6	85.56	2162.4	
F-107	Carr. México-Texcoco km 27+500 Pueblo Coautlalpan Mpio. Sn. Vicente Chicoloapan	509340	2147819	2248	51.75	2196.3	55.58	2192.4	
F-131	Carr. México-Texcoco km 30+000 Pueblo San Vicente Chicoloapan Mpio. San Vicente Ch.	508852	2147119	2243	44.65	2198.4	*60.02	2183.0	0.9518
F-236V	Texcoco, Municipio de Texcoco	512502	2146924	2218	Sin registro anterior a la fecha		*97.26	2120.7	0.9687
F-242	Carretera Federal México-Texcoco Km 28 +000 Pueblo san Vicente Chicoloapan Mpio. Sn Vicente Ch	508749	2146340	2245	42.35	2202.7	*63.44	2181.6	0.9790
F-626V	Carr. México-Texcoco km 28+500 Calle Fco. I Madero s/n Col. Guadalupe Mpio. Chimalhuacán	507730	2146110	2219	*45.6	2173.4	69.22	2149.8	0.9261
F-992V	Carr. México-Texcoco km 28+000 Camino a las minas Mpio. San Vicente Chicoloapan	511670	2145913	2263	71.63	2191.4	92.10	2170.9	
I-1-AV		509448	2147773	2242	51.46	2190.5	77.79	2164.2	
I-31-A	Carr. México-Veracruz km 45+000 Pueblo La Resurrección Mpio. Texcoco	516534	2158640	2278	75.45	2202.6	95.06	2182.9	
I-45-AV	Camino a Molino de las Flores Pueblo Texcoco Mpio. Texcoco	515628	2157261	2284	79.08	2204.9	*99.23	2184.8	0.9928
I-46-A	Camino al Molino de las Flores Pueblo Nativitas Mpio. Texcoco	516033	2157053	2298	93.83	2204.2	*109.58	2188.4	0.9276
I-97-BV	Texcoco, Municipio de Texcoco	514119	2149158	2300	109.79	2190.2	*113.86	2186.1	0.8974
I-110-B	Parque Nacional Molino de las Flores Pueblo Texcoco Mpio. Texcoco	516669	2157498	2290	85.96	2204.0	104.12	2185.9	

ANEXO B. Estratigrafía de Pozos

Ramal Peñón Texcoco

POZO No. 1 RAMAL PEÑÓN TEXCOCO

Localización

Coordenadas geográficas						Coordenadas UTM		ALTURA
Grados	Minutos	Segundos.	Grados	Minutos	Segundos.	X	Y	msnm
98	57	43	19	28	4	503,968	2'152,481	2,251

Corte litológico



SECRETARÍA DE AGRICULTURA
Y RECURSOS HIDRÁULICOS

COMISION DE AGUAS
DEL VALLE DE MEXICO

"RESIDENCIA POZOS"

México, D.F. a 24 de Julio de 1979.

POZO N° I TEXCOCO, ESTADO DE MEXICO

Columna Estratigráfica obtenida correlacionando

Registro Eléctrico y Muestras de Canal; extraídas del Pozo N° I Texcoco, -
Estado de México.

Es importante señalar que las muestras analizadas se presentan trituradas y alteradas, ya que la Perforación se realizó empleando Equipo de Percusión.

PROFUNDIDAD
(Mts.)

DESCRIPCION LITOLOGICA

0 - 42

No se muestreo.

42 - 44

Arcillas color café.

44 - 46

Arenas polimicticas, los fragmentos se presentan redondeados a subredondeados, el diámetro promedio es de 1/16 a 1mm.

46 - 66

Tobas color verdusco a rojizo, con una alteración muy alta debido a intemperismo químico de la hornblenda y los feldespatos.

66 - 76

Tobas color café y verde, con fragmentos líticos de escoria, dacita y piedra pomez.

76 - 88

PERDIDA DE CIRCULACION

88 - 96

Arena polimictica, los fragmentos se presentan, subredondeados a subangulosos, el diámetro promedio es de 1/16 a 2mm.

96 - 112	Arenas finas silíceas, el diámetro promedio es de 1/156 a 1/16 de mm.
112 - 128	Tobes silíceas arenosas color café.
128 - 140	Arenas polimicticas, los fragmentos se presentan redondeados a subredondeados, el diámetro promedio es de 1/16 a 3mm.
140 - 200	Graves de grávulo polimicticas, los fragmentos se presentan

POZO No. 2 RAMAL PEÑÓN TEXCOCO

Localización

Coordenadas geográficas						Coordenadas UTM		ALTURA
Grados	Minutos	Segundos.	Grados	Minutos	Segundos.	X	Y	msnm
-98	57	17.1684	19	28	24.84084	504,747	2'153,100	

Corte litológico

PROFUNDIDAD (M)	OBSERVACIONES
0 - 38	Limo con escasa arcilla medianamente cementada de color café grisáceo y contienen conchas fósiles microscópicas.
38 - 44	Deposito lacustre constituido por arenas finas, medianas y escasamente gruesa de composición basáltica, con gran contenido de conchas fósiles microscópicas.
44 - 152	No se recuperó muestra cabe la posibilidad de que en este trayecto no haya recuperado muestra debido a la existencia de limos deleznales y solubles en el agua.
152 - 250	Arenas gruesas, medianas y finas, subredondeados de composición principalmente andesítica, probablemente englobadas en limo que las hace escasamente cementadas. también se les aprecia varios grados de alteración lo cual les da colores que van de gris, gris claro, gris rosado y amarillento. contienen carbonatos y estas también fueron depositadas en un medio lacustre.

POZO No. 3 RAMAL PEÑÓN TEXCOCO

Localización

Coordenadas geográficas		Coordenadas UTM	
-98.9602	19.4763	504177.01	2153402.43

Corte litológico

Profundidad (m)	Descripción litológica
0-36	Arcilla verde de alta compresibilidad
36-250	Arena fina a gruesa

POZO No. 4 RAMAL PEÑÓN TEXCOCO

Localización

Coordenadas geográficas						Coordenadas UTM		ALTURA
Grados	Minutos	Segundos.	Grados	Minutos	Segundos.	X	Y	msnm
98	57	35	19	28	18	504,220	2'152,912	

Corte litológico



SECRETARIA DE AGRICULTURA
Y RECURSOS HIDRAULICOS

COMISION DE AGUAS
DEL VALLE DE MEXICO
DIRECCION GENERAL DE CONSTRUCCION
RESIDENCIA GENERAL DE OBRAS DEL VALLE
DE MEXICO

RESIDENCIA POZOS

POZO Nº 4 LAGO DE TEXCOCO

CLASIFICACION LITOLOGICA

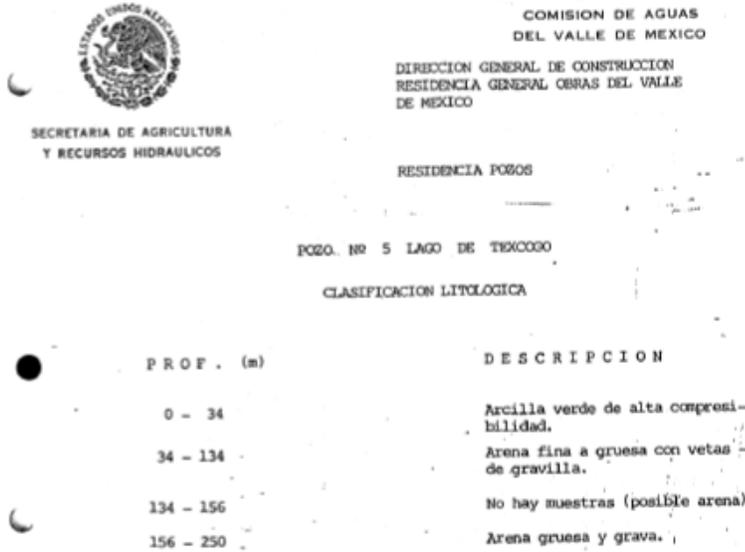
PROP. (m)	DESCRIPCION
0 - 40	Arcilla verde de alta compresibilidad
40 - 46	Arena fina a gruesa
46 - 56	Toba basáltica
56 - 94	No hay muestras (posible arena)
94 - 130	Arena media y fina
130 - 250	Arena gruesa y grava.

POZO No. 5 RAMAL PEÑÓN TEXCOCO

Localización

Coordenadas geográficas						Coordenadas UTM		ALTURA
Grados	Minutos	Segundos.	Grados	Minutos	Segundos.	X	Y	msnm
-98	57	23	19	28	40	504,560	2'153,576	

Corte litológico



POZO No. 6 RAMAL PEÑÓN TEXCOCO

Localización

Coordenadas geográficas						Coordenadas UTM		ALTURA
Grados	Minutos	Segundos.	Grados	Minutos	Segundos.	X	Y	msnm
-98	57	30	19	28	28	504,357	2'153,199	

Corte litológico

Profundidad (m)	Descripción litológica
0-32	Arcilla verde de alta compresibilidad
32-110	Arena media gruesa
110-294	Grava y arena gruesa
294-300	Toba arenosa

POZO No. 7 RAMAL PEÑÓN TEXCOCO

Localización

Coordenadas geográficas						Coordenadas UTM		ALTURA
Grados	Minutos	Segundos.	Grados	Minutos	Segundos.	X	Y	msnm
-98	57	21	19	28	8	504,629	2'152,610	

Corte litológico



SECRETARIA DE AGRICULTURA
Y RECURSOS HIDRAULICOS

COMISION DE AGUAS
DEL VALLE DE MEXICO

DIRECCION GENERAL DE CONSTRUCCION
RESIDENCIA GENERAL OBRAS DEL VALLE
DE MEXICO

RESIDENCIA POZOS

POZO No 7 LAGO DE TEXCOCO

CLASIFICACION LITOLOGICA

PROF. (m)	DESCRIPCION
0 - 40	Arcilla verde de alta compresibilidad.
40 - 250	Arena fina a gruesa con intercalaciones de estratos de grava.

POZO No. 13 RAMAL PEÑÓN-TEXCOCO

Localización

Coordenadas geográficas		Coordenadas UTM	
-99.0297	19.4594	496882.71	2151532.11

Corte litológico

Profundidad (m)	Descripción litológica
0-45	Arcilla de origen lacustre color café, la cual contiene microfósiles del tipo otrácodos (Cypridae)
45-48	No hay muestra
48-328	Arenas medias a finas subredondeadas, se observa la presencia de pómez, piroclásticos, restos de conchas de moluscos y ostrácodos Cypridae. Algunos líticos presentan arcillización moderada en la parte superior del estrato, aumentando éste fenómeno con la profundidad; a los 100 m desaparece el intemperismo y se observa además un cambio de granulometría pasando a ser la unidad, unas arenas gruesas redondeadas y gravas así como algunos detritos de roca ígnea de composición intermedia, el cuarzo se presenta en poca proporción y es redondeado; de 132 a 192 m cambia nuevamente la granulometría a arena media y a los 196 m vuelve a observarse la arena gruesa y guijas; de 289 a 321 la arena es de fina a media; de 321 a 328 se observa en los detritos un intemperismo incipiente.
328-368	No hay muestra
368-374	Toba lítica
374-384	Toba intemperizada
384-400	Sedimentos lacustres color claro, medianamente consolidados.

POZO No. 14 RAMAL PEÑÓN TEXCOCO

Localización

Coordenadas geográficas		Coordenadas UTM	
-99.0346	19.4576	496368.37	2151333.04

Corte litológico

Profundidad (m)	Descripción litológica
0-28	Detritos del tamaño de la arena y gravas arcillizados, restos de microfósiles del tipo de los ostrácodos.
28-42	Arcilla color café oscuro de origen lacustre
42 a 50	Arenas gruesas y gravas redondeadas, ocasionalmente presenta arcillización; la unidad contiene microfósiles.
50-62	Arcilla color café oscuro de origen lacustre
62-96	Arenas de medias a finas y que contienen microfósiles; se observan líticos de cuarzo redondeado, el estrato presenta arcillización y contenido de fósiles
96-220	No hay muestra
220-	Arenas de medias a gruesas subredondeadas con presencia de piroclásticos. Detritos ígneos y microfósiles; ocasionalmente se observa una arcillización incipiente.

POZO No. 15 RAMAL PEÑÓN TEXCOCO

Localización

Coordenadas geográficas						Coordenadas UTM		ALTURA
Grados	Minutos	Segundos.	Grados	Minutos	Segundos.	X	Y	msnm
-98	57	17.1684	19	28	24.84084	504,747	2'153,100	

Corte litológico



BUFETE GEOLOGICO E INGENIERIA BASICA, S.A. DE C.V.

COLUMNAS ESTRATIGRAFICAS DE LOS POZOS PERFORADOS EN LA CUENCA DE MEXICO

FECHA: 28/Oct./91 POZO No. 15 RAMAL: TEXCOCO - PEÑÓN Hoja No. UNO
 PROFUNDIDAD: 0 a 300 m
 LOCALIZACION: Municipio Texcoco, Estado de México. No. MUESTRAS: 109 ESCALA: 1:1,000

PROFUNDIDAD (m)	SIMBOLOGIA	DESCRIPCION LITOLÓGICA
0		ARENAS DE GRANO FINO Y MEDIO DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS SEMIOSCURO; CONSTITUIDAS DE FRAGMENTOS REDONDEADOS DE CUARZO, MINERALES FERROMAGNESIANOS, ESCORIA, TOBA ARCILLOSA, RESTOS DE FOSILES ORGANICOS Y CLASTOS DE ESCORIA VOLCANICA.
16		ARENAS DE GRANO MEDIO Y GRUESO DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO Y GRIS SEMIOSCURO; CONSTITUIDAS DE FRAGMENTOS SUBREDONDEADOS DE CUARZO, TOBA Y EN MENOR PROPORCION ESCORIA Y MINERALES FERROMAGNESIANOS.
32		ARENAS DE GRANO MEDIO Y FINO DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS SEMIOSCURO, COMPUESTAS POR FRAGMENTOS SUBREDONDEADOS DE CUARZO, TOBA, BASALTO Y MINERALES FERROMAGNESIANOS, ADEMAS RESTOS DE FOSILES ORGANICOS.
42		ARENAS DE GRANO MEDIO Y FINO DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS SEMIOSCURO; CONSTITUIDAS DE FRAGMENTOS SUBREDONDEADOS DE BASALTO, TOBA Y CUARZO, ADEMAS ALGUNOS RESTOS DE FOSILES ORGANICOS.
60		GRAVAS MEDIANAS DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS SEMIOSCURO; CONSTITUIDAS DE FRAGMENTOS DE BASALTO, TOBA Y ALGUNAS ARENAS FINAS DE CUARZO.
66		ARENAS DE GRANO MEDIO Y GRAVAS DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS SEMIOSCURO; CONSTITUIDAS DE FRAGMENTOS SUBREDONDEADOS DE BASALTO Y TOBA LAS ARENAS, Y LAS GRAVAS DE CLASTOS DE ESCORIA VOLCANICA; ADEMAS DE RESTOS DE FOSILES ORGANICOS Y CALICHE.
80		ARENAS DE GRANO FINO Y MEDIO DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO VERDOSO; CONSTITUIDAS PRINCIPALMENTE DE FRAGMENTOS SUBREDONDEADOS DE CUARZO Y EN MENOR PROPORCION TOBAS, BASALTO Y MINERALES FERROMAGNESIANOS; OCASIONALMENTE GRAVAS CRUESAS DE ESCORIA VOLCANICA Y RESTOS DE FOSILES ORGANICOS.
146		ARENAS DE GRANO MEDIO Y FINO DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS SEMIOSCURO; CONSTITUIDAS DE FRAGMENTOS SUBREDONDEADOS DE BASALTO ESCORIACEO, TOBA Y CUARZO.
		BASALTOS ESCORIACEOS MUY ALTERADOS DEPOSITADOS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS SEMIOSCURO.

PROFUNDIDAD (m)	SIMBOLOGIA	DESCRIPCION	LITOLOGICA
146		NO SE RECUPERARON MUESTRAS POR PERDIDA TOTAL DE CIRCULACION DE LODOS DE PERFORACION.	
228			
230			
236		ARENAS DE GRANO FINO CON GRAVAS, DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO; CONSTITUIDAS DE FRAGMENTOS Y CLASTOS SUBREDONDEADOS Y REDONDEADOS DE BASALTO, TOBA VITREA, VIDRIO Y MINERALES FERROMAGNESIANOS.	
244		ARENAS Y EN MENOR PROPORCION GRAVAS, DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO; CONSTITUIDAS POR FRAGMENTOS SUBREDONDEADOS DE ESCORIA, CUARZO Y MINERALES FERROMAGNESIANOS, ADEMAS ALGUNOS CLASTOS DE BASALTO ALTERADO.	
254		GRAVAS MEDIANAS Y ARENAS DE GRANO FINO, DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO; CONSTITUIDAS POR CLASTOS Y FRAGMENTOS REDONDEADOS Y SUBREDONDEADOS DE BASALTO ALTERADO, TOBA VITREA Y CUARZO.	
256		GRAVAS GRUESAS Y EN MENOR PROPORCION ARENAS DE GRANO MEDIO Y FINO DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO; CONSTITUIDAS POR CLASTOS Y FRAGMENTOS REDONDEADOS Y SUBREDONDEADOS DE BASALTO ALTERADO, ESCORIA Y CUARZO.	
260		ARENAS DE GRANO FINO Y EN MENOR PROPORCION GRAVAS GRUESAS, DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO; CONSTITUIDAS POR FRAGMENTOS Y CLASTOS SUBREDONDEADOS Y REDONDEADOS DE TOBA VITREA, ESCORIA, BASALTO ALTERADO Y CUARZO.	
266		ARENAS VOLCANICAS DE GRANO FINO, DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO; CONSTITUIDAS PRINCIPALMENTE POR VIDRIO, ESCORIA Y MINERALES FERROMAGNESIANOS.	
		ARENAS DE GRANO FINO Y MEDIO CON GRAVAS, DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO; CONSTITUIDAS POR FRAGMENTOS Y CLASTOS SUBREDONDEADOS Y REDONDEADOS DE TOBA VITREA, ESCORIA Y CUARZO.	

PROFUNDIDAD (m)	SIMBOLOGIA	DESCRIPCION	LITOLOGICA
266		ARENAS VOLCANICAS DE GRANO FINO DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO; CONSTITUIDAS PRINCIPALMENTE POR FRAGMENTOS DE VIDRIO, ESCORIA Y ALGUNAS GRAVAS DE BASALTO.	
274		ARENAS DE GRANO FINO CON GRAVAS MEDIANAS Y GRUESAS, DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO; CONSTITUIDAS PRINCIPALMENTE POR FRAGMENTOS SUBREDONDEADOS DE TOBA VITREA Y VIDRIO, ADEMAS DE CLASTOS DE TOBA VITREA Y LIMOS.	
278		GRAVAS GRUESAS Y ARENAS DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO; CONSTITUIDAS POR FRAGMENTOS Y CLASTOS DE TOBA VITREA, VIDRIO Y ESCORIA VOLCANICA.	
291		ARENAS VOLCANICAS DE GRANO FINO DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO; CONSTITUIDAS POR FRAGMENTOS SUBREDONDEADOS DE TOBA VITREA, VIDRIO, ESCORIA Y MINERALES FERROMAGNESIANOS.	
294		GRAVAS MEDIANAS Y GRUESAS CON ARENAS DE GRANO FINO, DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO; CONSTITUIDAS DE FRAGMENTOS SUBREDONDEADOS DE TOBA VITREA, VIDRIO Y BASALTO ESCORIACEO.	
298		BRECHAS VOLCANICAS MUY ALTERADAS, COLOR GRIS SEMIOSCURO.	
300		GRAVAS GRUESAS Y EN MENOR PROPORCION ARENAS DE GRANO FINO DEPOSITADAS EN UN MEDIO LACUSTRE, COLOR GRIS CLARO; CONSTITUIDAS POR CLASTOS Y FRAGMENTOS SUBREDONDEADOS DE BASALTO, TOBA VITREA, ESCORIA Y VIDRIO.	

CLASIFICO:

M. F. Lara

ING. MANUEL GONZALEZ LARA.
GEOLOGO.

REVISO:

M. Bernabe Camiro Perez

ING. M. BERNABE CAMIRO PEREZ
DIRECTOR GENERAL.

CONFORME:

ING. JESUS R. ALFARO MONTOYA
JEFE DEPTO. DE GEOLOGIA Y GEOTECNIA
SUBGERENCIA DE ESTUDIOS BASICOS.