



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

IMPACTO DEL RELLENO DE SOCAVONES CON MATERIAL CONTAMINANTE AL ACUÍFERO NORORIENTAL DE TEXCOCO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL
DEL AGUA**

PRESENTA:

HARLEY YULETH LÓPEZ HERNÁNDEZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DR. OMAR ELMER ARANA MUÑOZ



Chapingo, Estado de México, Diciembre 2019.

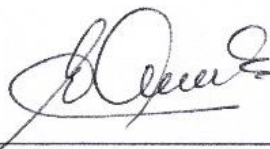


**IMPACTO DEL RELLENO DE SOCAVONES CON MATERIAL
CONTAMINANTE AL ACUÍFERO NORORIENTAL DE TEXCOCO**

Tesis realizada por el **ING. HARLEY YULETH LÓPEZ HERNÁNDEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

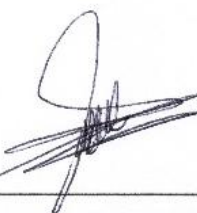
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: _____



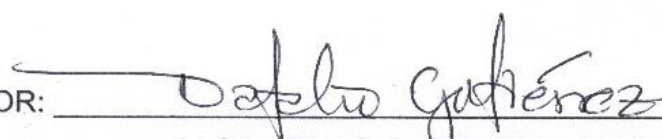
DR. OMAR ELMER ARANA MUÑOZ

ASESOR: _____



DR. AURELIO REYES RAMÍREZ

ASESOR: _____



M.C NATALIO GUTIERREZ CARRILLO

CONTENIDO

1.	Introducción	1
1.1.	Justificación	2
1.2.	Objetivos.....	3
1.3.	Antecedentes.....	3
1.4.	Presentación de cada capítulo.....	4
1.4.1.	Capítulo 2. Revisión de literatura	4
1.4.2.	Capítulo 3. Antecedentes del suelo de Ex – Lago de Texcoco.	4
1.4.3.	Capítulo 4. Calidad del agua potable en las comunidades aledañas a las minas de Tlaminca y Tequexquinahuac.	4
1.4.4.	Capítulo 5. Determinación del tiempo del movimiento del flujo del agua en la zona saturada hacia los pozos de las comunidades de Texcoco aledañas a las minas de Tlaminca y Tequexquinahuac.....	4
2.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1.	Descripción del área de estudio.....	6
2.1.1.	Zona de estudio.....	6
2.1.2.	Clima	7
2.1.3.	Geología del subsuelo.....	7
2.1.4.	Hidrología subterránea.....	8
2.1.5.	Hidrogeología	9
2.1.6.	Tipo de suelo en el sitio de recarga.....	10
2.1.7.	Profundidad del nivel estático	11
2.1.8.	Elevación del nivel estático	12
2.2.	Calidad del agua.....	12
2.3.	Daños a la salud como consecuencia de la calidad del agua.....	14
2.4.	Contaminación del agua	14

2.5.	Contaminación de acuíferos	15
2.6.	Fuentes de contaminación para acuíferos	16
2.7.	Principales contaminantes del agua subterránea	16
2.7.1.	Microorganismos patógenos	17
2.7.2.	Desechos orgánicos.....	17
2.7.3.	Sustancias químicas inorgánicas	18
2.7.4.	Nutrientes vegetales inorgánicos	18
2.7.5.	Compuestos orgánicos.....	19
2.7.6.	Sedimentos y materiales en suspensión	19
2.7.7.	Sustancias radiactivas.....	20
2.7.8.	Contaminación térmica.....	20
2.7.9.	Metales.....	20
2.8.	Agua subterránea	21
2.9.	Distribución del agua en el subsuelo	21
2.9.1.	Zona de aireación.....	21
2.9.2.	Zona de saturación.....	22
2.10.	Movimiento del agua en el suelo	22
2.11.	Movimiento del agua en los medios porosos no saturados	25
2.12.	Movimiento del agua en el medio saturado	26
2.12.1.	Ley de Darcy	27
2.12.2.	Cálculo del flujo subterráneo	27
2.12.3.	Parámetros hidráulicos.....	28
2.13.	Zona de recarga	32
2.14.	Factores que influyen en la recarga.....	32
2.14.1.	Infiltración	32
2.15.	Literatura citada	35
3.	ANTECEDENTES DEL SUELO DEL EX – LAGO DE TEXCOCO.....	37

3.1.	Geología (Ex – Lago Texcoco)	37
3.2.	Composición del suelo del Ex – Lago de Texcoco	37
3.3.	Antecedentes del Ex – Lago de Texcoco.....	39
3.3.1.	Principales residuos sólidos municipales	40
3.3.2.	Principales residuos sólidos industriales	41
3.4.	Conclusiones.....	41
3.5.	Literatura citada	42
4.	CALIDAD DEL AGUA POTABLE EN LAS COMUNIDADES ALEDAÑAS A LAS MINAS DE TLAMINCA Y TEQUEXQUINAHUAC	44
4.1.	Introducción	44
4.2.	Materiales y métodos.....	46
4.2.1.	Fase de campo.....	46
4.2.2.	Trabajo de laboratorio	47
4.2.3.	Análisis físicos.....	48
4.2.4.	Análisis químicos.....	49
4.3.	Resultados y discusión	51
4.3.1.	Determinación de coliformes totales y fecales	51
4.3.2.	Concentración de alcalinidad, dureza y cloruros	52
4.3.3.	Conductividad eléctrica y pH.....	53
4.3.4.	Concentración de sulfatos, sodio, potasio y fósforo	54
4.3.5.	Concentración de nitratos y nitritos	55
4.3.6.	Concentración de metales.....	55
4.4.	Conclusiones	57
4.5.	Literatura citada	58
5.	DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DEL MOVIMIENTO DEL FLUJO DEL AGUA EN LA ZONA SATURADA HACIA LOS POZOS DE LAS COMUNIDADES DE TEXCOCO ALEDAÑAS A LAS MINAS TLAMINCA Y TEQUEXQUINAHUAC.....	59
5.1.	Introducción	59

5.2.	Metodología	61
5.2.1.	Obtención de información	61
5.2.2.	Configuración de la elevación del nivel estático	61
5.3.	Resultados y discusión	63
5.4.	Conclusiones	66
5.5.	Literatura citada	67
6.	Conclusiones generales	68
7.	recomendaciones.....	69

LISTA DE CUADROS

Tabla 1. Porosidad eficaz de materiales naturales.	29
Tabla 2. Permeabilidad de sedimentos.	30
Tabla 3. Pozos muestreados.	46
Tabla 4. Características químicas del agua: alcalinidad, dureza y cloruros.	52
Tabla 5. CE y pH de los pozos muestreados.	53
Tabla 6. Concentración de sulfatos, sodio, potasio y fósforo.	54
Tabla 7. Concentración de nitratos y nitritos (mg/l)	55
Tabla 8. Límite permisible para metales en agua potable.	55
Tabla 9. Medidas de cada celda y gradiente hidráulico.	63
Tabla 10. Cálculo de caudal para cada celda.	64
Tabla 11. Cálculo de velocidad real para cada celda con el valor mínimo de S_y	64
Tabla 12. Cálculo de velocidad real para cada celda con el valor máximo de S_y	64
Tabla 13. Tiempo de desplazamiento de flujo del agua desde las celdas a cada pozo.	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del acuífero de Texcoco.	6
Figura 2. Caldo lactosado y Caldo lactosado bilis verde brillante.	47
Figura 3. Concentración de metales en los pozos muestreados.	56
Figura 4. Concentración de níquel.	57
Figura 5. Celda para cálculo de flujo subterráneo.	63

DEDICATORIA

A mi pequeña Mily.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por otorgarme el apoyo financiero a través de la Maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo, por la formación académica e integral brindada durante todos estos años, por ser mi segundo hogar y permitirme forjar un mejor futuro.

Al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, por la formación académica y de investigación brindada.

Al comité asesor: Dr. Omar E. Arana Muñoz, Dr. Aurelio Reyes Ramírez, M. C. Natalio Gutiérrez, por la guía de este proyecto, por compartir sus conocimientos y por el apoyo que me ha sido brindado durante este tiempo.

A mi familia por el apoyo que siempre me han brindado, en especial a mi madre que con su ejemplo me ha enseñado a no rendirme jamás y a mi abue por sus palabras e inmenso amor.

A Mily por darle una mayor alegría a mi vida, por esperarme todos los días con tanto amor.

A Chris por compartir este tiempo conmigo, por su agradable compañía, por todo el cariño y el apoyo que me brinda día a día.

A mis amigos, en especial a Mario por su bonita amistad y a Carlos por mostrarme que con paciencia, esfuerzo y constancia se pueden alcanzar las metas.

A Gama por la paciencia hacia conmigo todo este tiempo, el apoyo que me ha brindado y sobre todo el compartir sus conocimientos.

Gracias a todos aquellos que colaboraron de alguna forma durante el desarrollo de esta investigación: a las comunidades que me facilitaron el trabajo con sus pozos, al personal de laboratorio por su ayuda en los análisis realizados.

¡Gracias!

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos Personales

Nombre: Harley Yuleth López Hernández

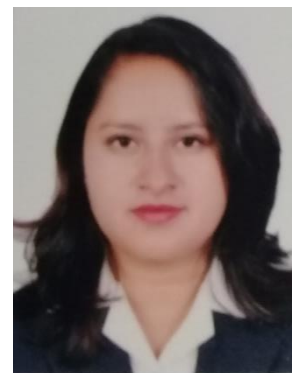
Fecha de nacimiento: 02 de marzo de 1993

Lugar de nacimiento: Santiago Comaltepec, Ixtlán,
Oaxaca

CURP: LOHH930302MOCPRR05

Profesión: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

Cédula profesional: 10588785



Desarrollo Académico

Inició sus estudios de media superior en la Preparatoria Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo en el año 2008. Ingresa en el año 2011 al Departamento de Suelos en la Universidad Autónoma Chapingo donde cursa la Carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables egresando en junio del 2016, para posteriormente titularse en diciembre del mismo año por medio de tesis con el nombre de “Los manejos orgánico y convencional y el comportamiento del nitrógeno a diferentes profundidades en el suelo y en el cultivo de maíz” bajo la dirección del Dr. David Cristóbal Acevedo. En agosto del año 2017, ingresa al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, obteniendo el grado de Maestría en Ingeniería en diciembre de 2019.

RESUMEN

Impacto del relleno de socavones con material contaminante al acuífero nororiental de Texcoco

Una de las principales fuentes que abastecen agua para el consumo humano son los acuíferos, los cuales son formaciones geológicas que permiten el almacenamiento de agua, sirven también como reserva y depósito; la disponibilidad del agua se ha convertido en una limitante para el desarrollo integral de la población, esto se debe a diversas causas como el aumento de la población y la contaminación a cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos. El estudio del agua subterránea y el monitoreo de la calidad del agua es de suma importancia ya que permiten tomar medidas preventivas de posibles epidemias causadas por contaminación que generen riesgo a la salud del ser humano, o bien, medidas de remediación. En este estudio se muestrearon 11 pozos cercanos a las minas de arena donde se ha depositado el escombros proveniente del Ex – Lago de Texcoco, Estado de México, ubicados en las localidades de la parte nororiental del acuífero de Texcoco, se evaluó la calidad del agua potable para las comunidades aledañas a las minas de arena siguiendo las normas que rigen los diferentes parámetros que se consideraron para esta evaluación; se obtuvo el tiempo aproximado en que se mueve el flujo de agua dentro de la zona saturada, y con ello el tiempo en que se presentará un efecto negativo en las comunidades aledañas a las minas. Los análisis físico –químicos y bacteriológicos mostraron valores favorables respecto a la calidad actual del agua para uso y consumo humano.

Palabras clave: Agua subterránea, calidad del agua, contaminación, porosidad

Tesis de Maestría en Ingeniería, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Harley Yuleth López Hernández
Director de Tesis: Dr. Omar Elmer Arana Muñoz

ABSTRACT

Impact of the filling of mines with contaminating material in the northeastern part of the Texcoco aquifer

Aquifers are among the main sources that supply water for human consumption, these are geological formations that store water and act as a reservoir and reserve. The availability of water has become a limitation for the integral development of population, this due to several causes such as population increase and pollution of both, surface and underground bodies of water. The study of groundwater and the quality monitoring are important because they allow to take preventive actions of possible epidemics caused by pollution that generate risk to human health, or remediation actions. In this study, 11 wells near the sand mines, where debris from the Ex – Texcoco Lake, state of México, located in the towns of the northeastern part of the Texcoco aquifer were sampled, the water quality for the communities consumption near the sand mines was evaluated following the Mexican standards for drinking water; the approximate time in which the water flow moves within the saturated zone was obtained, and with it the time in which a negative effect will be presented in the communities near the mines. The physical-chemical and bacteriological analyzes showed favorable values for human use and consumption.

Keywords: Groundwater, water quality, pollution, porosity.

Master's degree thesis on Ingeniería, Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Harley Yuleth López Hernández

Advisor: PhD. Omar Elmer Arana Muñóz

1. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es el agua que ocupa completamente los espacios porosos del sedimento y las rocas en la zona de saturación del acuífero. El límite superior de esta zona es el nivel freático. La zona no saturada se encuentra por encima del nivel freático, es decir, donde no está saturado el suelo, el sedimento ni la roca (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Los recursos hídricos superficiales y subterráneos, son parte de los depósitos de agua más utilizados por el ser humano debido a su accesibilidad. El agua subterránea se encuentra en las capas profundas de la Tierra (Fitss, 2002). Es un recurso natural vital para abastecer el medio urbano y rural, como suministro de agua potable, como para otras actividades humanas y para el funcionamiento de muchos ecosistemas (Forter, et al., 2002).

La disponibilidad de agua cada vez se convierte en una limitante para el desarrollo integral de las comunidades, lo anterior se debe a diversas causas, como el aumento de la población y con ello la demanda, también se atribuye a la disminución del volumen disponible tanto en almacenamientos superficiales como subterráneos, afectados por las prácticas inadecuadas del uso de la tierra causando impactos negativos, tanto en disponibilidad como en su calidad.

Como consecuencia de la contaminación del agua se presentan las enfermedades que se pueden agrupar en aquellas originas por sustancias químicas y microbiológicas; entre las sustancias químicas se encuentran los contaminantes que tienen propiedades tóxicas acumulativas, ejemplo de ello son los metales pesados y las sustancias carcinógenas siendo de mayor preocupación para la salud humana (Reif *et al.*, 1996).

La problemática que se ha presentado los últimos años sobre la contaminación que generará el depósito de los lodos y suelos salitrosos del Ex – Lago de Texcoco en los socavones ubicados en Tlaminca y Tequexquinahuac del

municipio de Texcoco, hace que el estudio de la calidad del agua en las comunidades cercanas a los socavones sea de gran importancia, puesto que esto permite conocer la calidad actual del agua, sus componentes y los riesgos actuales que presenta para la salud del municipio de Texcoco, así mismo, estimar el tiempo del movimiento del flujo de agua en la zona saturada de la zona nororiental del acuífero de Texcoco, permitirá conocer el tiempo en que los efectos en el relleno de socavones se presentarán en las comunidades más cercanas a este sitio.

1.1. Justificación

Desde décadas pasadas se han explotado los depósitos areneros de la vertiente Este del valle de Texcoco, en algunos casos, las excavaciones tienen profundidades de más de 80 metros, los yacimientos de arena se han agotado y solo queda la horadación del terreno.

Los propietarios sin escrúpulos ahora rentan esos lugares al gobierno federal y de la Ciudad de México para que viertan materiales procedentes del Ex – Lago de Texcoco en ellos, creando focos de contaminación para el minado acuífero de Texcoco, esta investigación busca esclarecer los efectos que pudieran presentarse en el futuro por estas actividades.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Evaluar el efecto contaminante por percolación profunda hasta el acuífero, el tiempo de llegada y los efectos de la contaminación al sistema.

1.2.2. Objetivos específicos

- Describir los componentes de los lodos y suelos salinos del Ex – Lago de Texcoco, depositados como relleno de socavones.
- Describir la calidad del agua de los pozos aledaños a las minas Tlaminca y Tequexquinahuac.
- Determinar la relación tiempo – distancia del movimiento del flujo de agua hacia los pozos de las comunidades de Texcoco aledañas a las minas.

1.3. Antecedentes

La importancia de la Zona del Ex –Lago de Texcoco viene desde la era prehispánica hasta la actualidad, principalmente por ser una fuente de recursos naturales a quien habitaron el lugar antes de la llegada de los españoles y hasta a mediados del siglo XX (Delgado, 2015).

El valle de Texcoco cuenta con arroyos de poca importancia, pues no se aprovechan para ningún fin; estos se presentan como pequeños escurrimientos durante el periodo de lluvias y la mayoría se encuentran contaminados. Estos arroyos se forman en la zona alta de las sierras del oriente, desembocando de manera natural en la laguna de Jolpango, último reducto del Ex - Lago de Texcoco y en el lago artificial Nabor Carrillo.

1.4. Presentación de cada capítulo

1.4.1. Capítulo 2. Revisión de literatura

En este capítulo se describe la zona de estudio, sus características respecto al clima, geología, hidrogeología y tipo de suelo en la parte nororiental de Texcoco; se describen también los conceptos básicos de la calidad del agua, se mencionan los principales contaminantes del agua, de donde provienen y los posibles efectos que se puedan ocasionar a la salud humana. Finalmente se hace mención de los conceptos de agua subterránea y su distribución en el subsuelo, el movimiento del agua en la zona no saturada y zona saturada y los parámetros que rigen el flujo de agua en estas zonas.

1.4.2. Capítulo 3. Antecedentes del suelo de Ex – Lago de Texcoco.

En este capítulo se describe la geología, la composición del suelo del Ex – Lago de Texcoco y se señalan los principales antecedentes del Ex – Lago, con la finalidad de conocer los componentes de los suelos que fueron extraídos de esta zona y transportados a la zona nororiental de Texcoco como relleno de socavones en Tlaminca y Tequexquinahuac.

1.4.3. Capítulo 4. Calidad del agua potable en las comunidades aledañas a las minas de Tlaminca y Tequexquinahuac.

Este capítulo se refiere a la calidad del agua, se hace una descripción de los materiales y métodos que se utilizaron para hacer el muestreo de los pozos de interés para este estudio, los análisis que se realizaron en laboratorio, con ello los resultados obtenidos para conocer la calidad actual del agua en esta zona.

1.4.4. Capítulo 5. Determinación del tiempo del movimiento del flujo del agua en la zona saturada hacia los pozos de las comunidades de Texcoco aledañas a las minas de Tlaminca y Tequexquinahuac.

En este capítulo se describe la metodología que se siguió para calcular el flujo de agua en la zona saturada, se muestran los cálculos realizados para la

obtención de los datos de caudal de flujo, velocidad y tiempo en que el flujo de agua se moverá en esta zona, permitiendo tener conclusiones previas a lo que en un futuro sucederá en la parte nororiental del acuífero de Texcoco.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Descripción del área de estudio

2.1.1. Zona de estudio

“El acuífero Texcoco, se encuentra en la porción centro-oriental del Estado de México; se localiza geográficamente entre los paralelos 19° 18' y 19° 38' de latitud norte y los meridianos 98° 39' y 99° 03' de longitud oeste, abarca una extensión de 934 km² “ (CONAGUA, 2015).

“Al norte limita con el acuífero Cuautitlán-Pachuca, que pertenece al Estado de México; al este con el acuífero Soltepec, que pertenece al estado de Tlaxcala; al sur y sureste está limitado con el acuífero Chalco-Amecameca, ubicado en el Estado de México y en la parte oeste con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México” (CONAGUA, 2015).

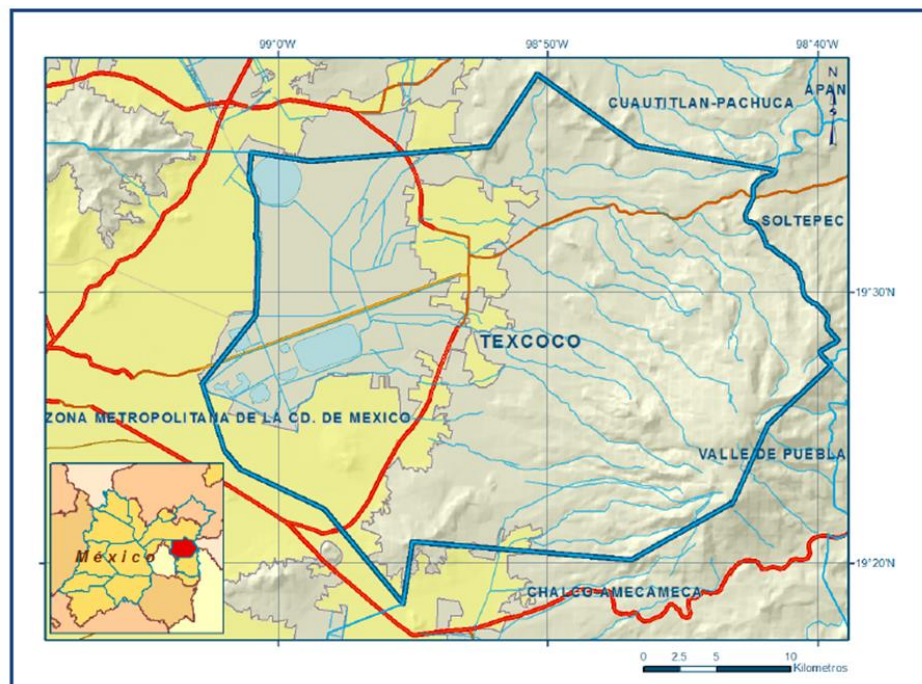


Figura 1. Localización del acuífero de Texcoco.

“La superficie del acuífero abarca totalmente los municipios Chicoloapan, Chimalhuacán, Chiconcuac, Papalotla y Texcoco; cubre en su totalidad a Atenco, Chiautla, Ixtapaluca, Nezahualcóyotl, La Paz y Tepetlaoxtoc; también en ciertas áreas de los municipios Acolman, Ecatepec de Morelos y Tezoyuca” (CONAGUA, 2015)

2.1.2. Clima

El clima que predomina es BS1 kw(w) (i') seco templado o árido templado con verano cálido, presenta lluvias en verano y un por ciento de lluvia invernal menor de 5% anual, con temperaturas medias anuales que oscilan entre 5 y 7 °C. En las estribaciones de la sierra más altas se tiene el clima semifrío subhúmedo, con lluvias durante el verano, temperatura media anual oscila entre 5 y 12 °C, con un por ciento de lluvias invernales normalmente menor de 5%. En la parte más alta que corresponde al Monte Tláloc el clima que se presenta es frío, con temperatura media anual entre -2 y 5 °C e invierno bastante notorio, todo esto es de acuerdo con la clasificación climatológica de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana.

2.1.3. Geología del subsuelo

“Considerando los cortes litológicos de pozos y sondeos geofísicos se establece que el subsuelo de la esta región se conforma en la parte más superficial por arcillas cuya capa tiene un espesor promedio de 50 m, subyacentes por una gran capa de sedimentos aluviales, compuesto por arcillas, gravas, areniscas, conglomerados de origen volcánico y rocas volcánicas, primordialmente tobas, los cuales llegan a alcanzar los 1500m de espesor” (CONAGUA,2015)

El acuífero se constituye en la parte superior por arcilla de alta porosidad, con baja permeabilidad y gran heterogeneidad, ésta forma un acuitardo de espesor variable que funciona como acuífero de tipo confinante o semiconfinante en la parte céntrica de la cuenca. Debajo de ésta se localiza el acuífero que, en la

actualidad se está explotando, formado principalmente por material granular de mayor grosor que el del acuitardo, depósitos vulcanoclásticos y conglomerados de origen volcánico, con espesor y propiedades hidráulicas variables, generalmente mayor de 200m. Le subyacen rocas volcánicas fracturadas, su base se encuentra hasta 2,000 m en la parte centro del valle, y disminuye hacia las orillas de la cuenca (CONAGUA, 2015).

2.1.4. Hidrología subterránea

“El acuífero se ubica en la Región Hidrológica No. 26, Pánuco, Subregión Hidrológica Valle de México, cuenca del Río Moctezuma. El sistema hidrográfico del acuífero se integra principalmente por los escurrimientos temporales e intermitentes de carácter torrencial, ocasionando avenidas de poca duración y arroyos que se mantienen secos durante el tiempo de estiaje. En el espacio que conforma el acuífero se identifican 9 cuencas, cuyos cauces principales pertenecen a los Ríos Papalotla, Xalapango, Coxcacoco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica, Coatepec y San Francisco; todos ellos provienen de la Sierra Nevada, estos desembocan en la zona federal del Ex - Lago de Texcoco y su destino final es el Dren Colector del Valle, que se juntan finalmente con las aguas residuales de la Ciudad de México” (CONAGUA, 2015)

“El rasgo hidrológico con mayor importancia es el sistema de lagos que forman parte del Proyecto Lago de Texcoco, éste recoge aguas residuales originadas de Chimalhuacán, Ciudad Nezahualcóyotl y Ecatepec; las entradas provenientes de las sierras del oriente, además de los ríos La Compañía y Churubusco, cuyos escurrimientos son miden en varias estaciones hidrométricas, entre estos destacan La Draga, Tepexpan, La Grande, Los Reyes y Puente La Llave” (CONAGUA, 2015)

“El primer río que confluye de norte a sur rumbo al lago de Texcoco, es el Río San Juan Teotihuacán, este atraviesa el municipio de Acolman, los

escurrimientos se miden en la estación hidrométrica Tepexpan. Otro de los ríos es el Papalotla, cuyos escurrimientos son medidos en la estación La Grande, en el municipio de Texcoco. Más adelante, confluye el Río Xalapango, cuyo caudal se mide en la estación Atenco. Entre los principales aportadores de agua al sistema de lagos se encuentra el Río La Compañía, cuyo caudal se mide en la estación Los Reyes. De las principales corrientes aportadoras, destacan también el Río Churubusco, proveniente de la Ciudad de México cuyo caudal de aportación se registra en la estación Puente La Llave” (CONAGUA, 2015)

2.1.5. Hidrogeología

“Gracias a la información obtenida de los cortes litológicos de pozos, sondeos geofísicos y las evidencias geológicas e hidrogeológicas, se define la existencia de un acuífero denominado libre a semiconfinado heterogéneo y anisótropo, que se constituye en la parte superior por arcillas lacustres en el centro del valle, seguida de materiales granulares aluviales, rocas y depósitos volcánicos (tobas, brechas, andesitas y cenizas), se intercala con sedimentos arcillosos, que en conjunto muestran permeabilidad media con un espesor promedio de 1500 m, esto permite la infiltración, la circulación y el almacenamiento de agua subterránea; en la parte inferior se encuentra en rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria debido al fracturamiento. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico se representan por los sedimentos arcillosos” (CONAGUA, 2015)

Mediante perforaciones profundas realizadas dentro de la cuenca del Valle de México se puede encontrar una secuencia de rocas calizas cretácicas donde se halla un acuífero confinado por sedimentos lacustres y presencia de rocas arcillosas (CONAGUA, 2015).

El material impermeable del acuífero Texcoco lo conforman rocas volcánicas antiguas, andesitas y calizas, en tanto que el paquete sedimentario vulcanoclástico origina a un sistema acuífero complejo conformado por tres

grandes cuerpos. “En la parte superior, por arcilla con alta porosidad, con una permeabilidad baja y gran heterogeneidad en su constitución, formando un acuitardo de espesor variable que actúa como confinante o semiconfinante en la parte centro de la cuenca” (López, 1993). Posteriormente se encuentra el acuífero que actualmente está en explotación, formado por material granular grueso permeable, contiene piroclastos y conglomerados de origen volcánico y aluvión. Su espesor es variable (generalmente mayor de 200 m), al igual que sus propiedades hidráulicas. Le subyacen rocas volcánicas fracturadas y tobas, cuya base llega a encontrarse a los 2000 m en la parte centro, disminuyendo hacia las orillas de la cuenca (López, 1993).

2.1.6. Tipo de suelo en el sitio de recarga

Frutuoso (2017) menciona que los suelos presentes en el municipio de Texcoco son Cambisol en la parte alta, Estos suelos tienen formación de por lo menos un horizonte subsuperficial incipiente. El material parental se va transformando y se comienza a observar a partir de la formación de estructura y decoloración especialmente parduzca, esto sucede porque aumente el porcentaje de arcilla y se remueven los carbonatos, pasando de textura media a fina provenientes de diferentes rocas. Se identifican por la meteorización del material parental que va de ligera a moderada y por la ausencia de arcilla aluvial y de material compuesto por aluminio y hierro o fierro.

López (2017) describió el suelo separándolo por fases para facilidad en su estudio, siendo estas dos del interés del presente trabajo: 1. Fase Tlaminca, franco, típica con pendiente de 1 a 3% y 2. Fase Tlaminca, migajón arenoso, somera (3 a 4% de pendiente).

Fase Tlaminca, franco, típica (1 a 3% de pendiente), estos suelos que corresponden al territorio que actualmente es Tequexquihuac, son suelos moderadamente profundos; el estrato superficial tiene un espesor de 10 a 20 cm, de color pardo grisáceo muy oscuro, de textura franca y estructura

débilmente desarrollada, poliédrica subangular, fina: Le sigue un estrado de 40 a 50 cm de espesor, de color negro, migajón arcilloso y estructura fuertemente desarrollada, poliédrica angular, mediana; y están limitados por un estratparo de color pardo con motas negras en su parte superior y débilmente cementado en la inferior. Son suelos de fertilidad baja, medianamente pobres en materia orgánica, alta capacidad de retención de humedad, permeabilidad lenta, imperfectamente drenados y de reacción neutra a ligeramente ácida.

Fase Tlaminca, migajón arenoso, somera (3 a 4% de pendiente) siendo la parte norte de Tequexquinahuac. El espesor máximo de estos suelos es de 40cm; el estrato superficial tiene de 5 a 10 cm de espesor, de color pardo grisáceo muy oscuro, migajón arenoso y estructura moderamente desarrollada, poliédrica subangular, fina; subyace al anterior un estrato de 20 a 30cm de espesor, negro, migajón, arcilloso arenoso, firme y de estructura moderamente desarrollada, poliédrica angular, mediana; está limitado por su estrato fuertemente cementado, de color pardo amarillento. Son suelos de fertilidad baja, pobres en materia orgánica, moderada capacidad de retención de humedad, permeabilidad lenta y reacción neutra.

2.1.7. Profundidad del nivel estático

Hernández y Tellez (2016) mencionan que las profundidades del nivel estático del acuífero de Texcoco han ido variando con el paso de los años, en 2004 en la parte que corresponde a las poblaciones de San Miguel Tlaixpan y San Nicolás Tlaminca los niveles fluctuaban entre los 75 y los 105 metros, para 2007 las profundidades se encontraban entre los 80 y 106 metros, para el 2010 se mantuvieron entre los 85 y 105 metros, para los datos del 2013 se muestra que el nivel más alto ubicado en esta zona estaba entre los 55 y 105 metros, y para el año 2016 las profundidades oscilan entre los 95 y 108 metros en las localidades mencionadas, siendo está la zona de interés para el presente estudio.

2.1.8. Elevación del nivel estático

Hernández y Tellez (2016) hacen mención de la evolución de la elevación del nivel estático, en el año 2004 las mayores elevaciones se ubicaban en la parte norte y nororiental del acuífero en las poblaciones de Tepetlaoxtoc, San Nicolás Tlaminca con elevaciones desde 2240 a 2285 msnm, para el año 2007 los valores iban desde los 2245 a los 2285 msnm, siendo la mayor elevación en el aprovechamiento ubicado en San Nicolás Tlaminca, en el año 2010 los valores de mayor elevación oscilaban entre 2205 y 2285 msnm, en el año 2013 la elevación más alta se reportó en la localidad de San Nicolás Tlaminca la cual rebasaba los 2280 msnm y para el año 2016 el punto más elevado se encontró también en la localidad de San Nicolás Tlaminca siendo esta mayor de 2285 msnm.

2.2. Calidad del agua

La calidad del agua se define a partir de su composición y el conocimiento de los efectos que pueden ocasionar cada uno de los elementos que contiene o el conjunto de todos ellos, la calidad del agua permite establecer el uso del agua, clasificando de acuerdo con límites estudiados el destino de éste ya sea para uso potable, agrícola, industrial, etc. (Custodio y Llamas, 1983).

Custodio y Llamas (1983) nombra potable a aquella agua que puede ser consumida por el hombre sin peligro alguno para su salud, teniendo en cuenta las distintas características del agua: físicas, química y bacteriológicas, definiendo criterios de calidad para cada una de ellas. El agua potable se define en las Guías de Calidad de la Organización Mundial de la Salud(OMS), como “el agua adecuada para el consumo humano y para todo uso doméstico habitual, incluida la higiene personal” (OMS, 1995).

Generalmente, la calidad del agua se determina haciendo una comparación de las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua mediante estándares para la calidad del agua. Se toma en cuenta la concentración de los

efectos y componentes ocasionadas por la existencia de distintas sustancias. Uno de los riesgos más peligrosos para la salud de la población se relaciona con la calidad del agua potable es aquel que proviene de la contaminación microbiológica, especialmente la fecal. Para una mayor protección de la salud humana es necesario que las fuentes de contaminación microbiológica se encuentren ubicadas alejadas de las fuentes de agua potable y así reducir o eliminar el peligro que presentan (PNUMA, 2008; Foster et al., 2003). Para evaluar los cambios que el agua subterránea pudiera tener respecto a su calidad, se emplea una serie de parámetros físicos, químicos y biológicos, también conocidos como indicadores de calidad del agua (Nissen et al., 2000).

El estudio de la calidad del agua destinada para el consumo humano ha sido, y es, de primordial importancia, interviniendo en él muchos factores que pueden afectarla de forma inmediata o diferida (Custodio y Llamas, 1983).

Es de suma importancia contar con un control para calidad y potabilidad del agua, puesto que ésta representa un medio de transmisión de enfermedades causadas por patógenos intestinales, tales como bacterias, protozoos, virus y helmintos; o bien mediante la contaminación fisicoquímica ocasionadas por diferentes sustancias y elementos no deseables de la composición habitual del agua que rebasan la concentración máxima permisible (Arboleda, 2000)

La calidad del agua es un elemento importante que determina las condiciones de la salud humana; las características del agua pueden beneficiar no solo la prevención sino también la transmisión de los agentes que originan enfermedades, como lo son: polio, hepatitis A, EDA, y parasitosis por protozoarios y helmintos; entre estas, helmitiasis, cryptosporidiasis, giardiasis y amebiasis. Dentro de la importancia de tener un control y vigilar la calidad del agua para el uso humano, está apoyar a recabar información que permitirá una buena toma de decisiones para mejorar la calidad, aportando beneficios en la salud pública, disminuyendo que se transmitan enfermedades causadas por la contaminación del agua (Briñez, Guarnizo y Arias, 2012).

2.3. Daños a la salud como consecuencia de la calidad del agua

Las enfermedades transmitidas por agua contaminada se pueden clasificar en las que son provenientes de contaminación por sustancias químicas y las generadas por formas biológicas. Las sustancias químicas tóxicas representan un riesgo para la salud, sin embargo, este riesgo es distinto al que pueden ocasionar los contaminantes microbiológicos.

Los problemas presentes en el agua relacionados con sustancias químicas presentes se deben principalmente a las que pueden afectar negativamente la salud tras períodos de exposición prolongados; los contaminantes con propiedades tóxicas que causan mayor inquietud son los metales pesados y las sustancias carcinógenas (Reif *et al.*, 1996).

La contaminación microbiológica se presenta de forma directa y/o indirecta ocasionado por excrementos humanas y animales. Existen diferentes formas de transmisión de patógenos, estos pueden ser de forma directa entre humano a humano, de humano a animal o de forma indirecta mediante el agua, objetos o alimentos, los cuales pudieron estar en contacto directo con materia fecal (Harrisson, *et al.*, 2002).

Es muy importante salvaguardar las fuentes de abastecimiento de agua potable, para poder proteger la salud del ser humano; eliminando y/o reduciendo el riesgo que pueda ocasionar la contaminación del agua. Éste tipo de contaminación se puede definir como la consecuencia de la adicción de sustancias u organismos que puedan afectar su calidad limitando su uso (Henningman, 1973).

2.4. Contaminación del agua

La contaminación del agua es un daño o alteración por efecto de productos extraños. El agua de lluvia, el agua de los mares, ríos, lagos, acuíferos, etc., es contaminada por los gases residuales, desechos de lugares habitados, fábricas

y ciudades, etc. (Prieto, 2004). La contaminación de agua se define como la modificación de las propiedades físicas, químicas o biológicas que restringen su uso (IMTA, 2012).

2.5. Contaminación de acuíferos

La calidad del agua se va deteriorando cuando la cantidad de los contaminantes en el subsuelo, ocasionados por las descargas y/o lixiviados provenientes de las actividades industriales, urbanas y mineras no tienen un control adecuado y ciertos componentes exceden la capacidad natural del subsuelo y de los estratos suprayacentes de aminorar sustancias, ya que el agua subterránea se mueve a través del subsuelo (Foster, *et al.*, 2002).

La sobreexplotación causa un efecto negativo en la calidad del agua debido a que los flujos extraídos a profundidades cada vez mayores son regularmente de elevada concentración salina y pueden contener elementos tóxicos (Carreón-Freyre *et al.*, 2005).

Los acuíferos han presentado una creciente amenaza respecto a la cantidad de agua como en su calidad, ocasionada por las actividades antropogénicas como la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y mineras. (Foster, *et al.*, 2002). Las actividades humanas han introducido ciertos contaminantes a la hidrósfera en aspectos, tales como la quema de combustibles fósiles, la fundición de minerales, las aguas residuales municipales, industriales, mediante efluentes de minería, vertederos, evacuación subterránea de desechos tóxicos, etc., estos contaminantes independientemente de su fuente, se dispersan fácilmente en los sistemas acuáticos y tienden a acumularse en los organismos vivos, provocando diversos trastornos y enfermedades en los ecosistemas (Jang-Soon *et al.*, 2009).

Los acuíferos debido a su lenta circulación de aguas, capacidad de adsorción de los terrenos y pequeño tamaño de los canalículos, pueden tardar mucho en manifestar la contaminación y muestran un notable poder depurador ante

diversos agentes contaminantes, aunque éste tiene un límite, que varía mucho según sea el agente que se tome en cuenta. Además, el gran volumen de agua que contienen ocasiona que las contaminaciones extensas se manifiesten muy lentamente y que las contaminaciones localizadas no aparezcan hasta después de un determinado tiempo, generalmente muy largo (Custodio y Llamas, 1983)

2.6. Fuentes de contaminación para acuíferos

La contaminación de los acuíferos es ocasionada por diversos focos, éstos pueden ser de origen doméstico, agrícola e industrial, entre otras fuentes de contaminación (Custodio et. al. 1983).

Conjuntamente del tipo de contaminante, las actividades que puedan originar la contaminación del agua subterránea se puede clasificar en 6 categorías:

- 1) Mediante fosas sépticas, pozos de inyección y la aplicación directa en el terreno.
- 2) Diversas actividades que almacenan o vierten sustancias, contenedores y otras formas de almacenamiento.
- 3) Transporte de sustancias.
- 4) Mediante la descarga de sustancias provenientes de actividades de riego, fertilización, drenaje proveniente de minas y de zonas urbanas.
- 5) La contaminación provocada por modificar los flujos naturales, pozos de producción.
- 6) Producidas por actividades antrópicas (interacción agua superficial-subterránea, intrusión marina, lixiviado natural) (Candela, 2002).

2.7. Principales contaminantes del agua subterránea

Debido a la gran variedad de agentes que provocan la contaminación de las aguas, se pueden clasificar según criterios muy diversos. Para simplificar su estudio y análisis, se han agrupado en ocho categorías o grupos.

2.7.1. Microorganismos patógenos

Los microorganismos patógenos se refieren a los diversos tipos de bacterias, virus, protozoos y otros tipos de microorganismos que transfieren enfermedades en el ser humano. En los países en vías de desarrollo uno de los motivos más frecuentes que ocasionan la muerte prematura son las enfermedades causadas por microorganismo patógenos.

Regularmente estos microorganismos alcanzan al agua mediante la materia fecal y otros residuos orgánicos que generan las personas infectadas. Considerando esto, para evaluar la salubridad del agua respecto a microorganismos el número de bacterias de tipo coliformes presentes en el agua, es un buen índice de evaluación; para lo que la OMS recomienda que la cantidad de coliformes en el agua potable debe de ser de 0 colonias por cada 100 ml de agua.

La causante de más del 90% de las intoxicaciones y transmisiones de enfermedades causadas por el agua contaminada es la contaminación microbiológica, estos microorganismos se pueden englobar las bacterias (*Escherichia coli*, *Salmonella* sp., *Shigella* spp., *Vibrio cholerae*, *Yersinia enterocolitica*, *Campylobacter jejuni*), virus (enterovirus, rotavirus, adenovirus), protozoos (*Giardia lamblia*, *Cryptosporidium parvum*, *Entamoeba histolytica*) y helmintos (*Ascaris lumbricoides*) (FAO-OMS, 2004).

2.7.2. Desechos orgánicos

Los desechos orgánicos se refieren al conjunto de residuos orgánicos procedentes por los seres humanos, y las actividades que se realizan, estos incluyen materia fecal entre otros materiales que suelen ser descompuestos mediante bacterias aeróbicas por consumo de oxígeno. La propagación de bacterias ocasiona disminución de oxígeno cuando los desechos se encuentran en grandes cantidades y ocasionan la muerte de los seres vivos que requieren oxígeno para vivir.

Un adecuado índice para la medición de la contaminación por desechos orgánicos es la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno). Mediante este índice se puede medir el consumo de oxígeno en un volumen de agua en un periodo de 5 días a una temperatura de 15°C a 20°C y en escenarios oscuros. Una DBO alta muestra contaminación y agua de mala calidad.

2.7.3. Sustancias químicas inorgánicas

Los ácidos, sales y metales tóxicos como el mercurio y plomo, se encuentran incluidas entre las sustancias químicas inorgánicas, si estos se encuentran en abundantes pueden ocasionar daños severos en los seres vivos, pueden causar también una alta reducción en los rendimientos agrícolas y dañar los equipos de trabajo.

2.7.4. Nutrientes vegetales inorgánicos

Nitratos, fosfatos y sulfuros son sustancias solubles en agua indispensables para el crecimiento y desarrollo de las plantas, al encontrarse en cantidades excesivas provocan un crecimiento inmoderado de algas y de otros organismos, causando que exista eutrofización en el agua. Al morir las algas otros vegetales también mueren, los descomponen otros microorganismos, posteriormente se agota el oxígeno y ocasiona que no sea posible la vida de otros seres vivos, obteniendo así un agua maloliente e inutilizable.

El nitrógeno suele presentarse en forma de NH_3 , NH_4 ; mediante la oxidación, estas formas de nitrógeno se reducen y transforman en NO_2 y posteriormente en NO_3 siendo esta la forma más común y estable (De Miguel, 1999). El ión nitrito suele presentarse en las aguas como resultado de la oxidación del NH_3 o bien siendo el resultado de la reducción microbiana. Su presencia en el agua se considera como una señal fundada de una posible contaminación reciente debido su inestabilidad; pueden estar presentes también como resultado de la disolución de rocas que los contenga.

En el agua subterránea el origen de los nitritos y nitratos puede ser procedencia química, generado principalmente por las descargas de aguas residuales industriales y el uso de fertilizantes orgánicos y nitrogenados en las áreas de uso agrícola. La forma de nitrógeno utilizable para las plantas es el nitrógeno como nitratos, es por ello que la proporción de nitrógeno lo determina el tipo de fertilizante a emplear, sin embargo, no todo el fertilizante se aprovecha, este se infiltra hacia el agua del acuífero (De Miguel y Vázquez, 2006).

2.7.5. Compuestos orgánicos

Entre las diversas moléculas orgánicas que finalizan en el agua y permanecen por largos periodos de tiempo se encuentran el petróleo, los plásticos, plaguicidas disolventes y detergentes, entre otros, éstos presentan estructuras moleculares complejas difíciles de degradar por microorganismos.

La contaminación producidos por accidentes petrolíferos libera el 12% del total de hidrocarburos que terminan en el mar. El resto proviene de la limpieza habitual con agua del mar, de los tanques y escapes de la industria petrolera. Se derraman entre 3 y 4 millones de hidrocarburos cada año. En la actualidad, la legislación nacional e internacional exige a los petroleros a contar con sistemas de limpieza en forma de circuito cerrado y evacuar los desechos en zonas condicionadas de carga y descarga de petróleo. Se menciona que los mares y los océanos son uno de los principales sumideros de la contaminación antrópica.

2.7.6. Sedimentos y materiales en suspensión

Diferentes partículas provenientes del suelo y llevadas al agua en conjunto con diversos materiales que existen en suspensión, son el principal origen de la contaminación del agua. Los sedimentos acumulados y la turbidez que se genera en el agua hace difícil la vida de muchos organismos, puesto que ocasionan problemas con los sitios de donde se alimentan y depositan sus

huevos los peces, saturan los lagos y pantanos, y evitan el flujo en canales, ríos y puertos.

2.7.7. Sustancias radiactivas

En el agua se llegan a presentar isótopos radiactivos solubles, acumulándose a lo largo de las cadenas tróficas, ocasionando concentraciones mayores de ciertos tejidos vivos que los que ya existían en el agua.

2.7.8. Contaminación térmica

Las centrales de energía y procesos industriales al liberar agua caliente ocasionan un aumento en la temperatura de ríos y/o embalses, generando una disminución en la capacidad de contener oxígeno, afectando la vida de los organismos aerobios.

Algunos ecosistemas costeros que cuentan con una alta diversidad biológica, se encuentran amenazados gravemente por las actividades que realiza el ser humano, como por ejemplo las marismas, los estuarios, los arrecifes de coral y los manglares (Álvarez, 2016).

2.7.9. Metales

Los metales pesados pertenecen a los contaminantes prioritarios más peligrosos, pueden entrar en los depósitos de agua y participar en reacciones de hidrólisis, adsorción, desorción, formación de complejos y precipitación. Bajo ciertas condiciones ambientales, los metales pesados pueden acumularse a una concentración tóxica y causar daños ecológicos (Altun, *et al.*, 2009)

Los metales pesados son contaminantes que alcanzan con facilidad los cuerpos de agua superficiales debido a su persistencia y transporte a grandes distancias, presentando un riesgo potencial para la biota; las actividades petroleras, agrícolas, azucareras y urbanas, generan estos contaminantes. En los ecosistemas, mediante las cadenas tróficas la elevada toxicidad de metales

se bioacumulan hasta llegar a los organismos superiores, incluso hasta llegar al ser humano (Herrera, *et al.*, 2012).

El agua subterránea y a su vez el agua potable sufre un inminente riesgo relacionado con el movimiento de los metales pesados (Kabata y Pendias, 2004). Entre los metales pesados se encuentran arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), talio (Tl) y uranio (U), como los de mayor interés respecto a la contaminación ambiental, los daños generados en la agricultura, y la salud del ser humano (Alloway, 1995). Sin embargo, dos de los metales pesados esenciales para las plantas, pero en bajas condiciones: cromo y níquel, se incluyen en este grupo puesto que su uso es excesivo en procesos industriales, lo que ha ocasionado su acumulación generando toxicidad en animales y plantas (Shanker *et al.*, 2005).

2.8. Agua subterránea

El agua subterránea se considera como una forma de agua pura (Izquierdo *et al.*, 2008) debido a que contiene en general poca materia orgánica y una baja concentración de microorganismos patógenos como consecuencia de su infiltración a través de potentes espesores de rocas y suelos, además de su elevado tiempo de residencia en el acuífero (Velázquez *et al.*, 2012).

Menderey, (2005) menciona que la mayor cantidad del agua subterránea proviene de la infiltración del agua de lluvia; los fenómenos de magnetismo y vulcanismo contribuyen a que exista agua subterránea.

2.9. Distribución del agua en el subsuelo

El agua se distribuye en el subsuelo en dos zonas: aireación y saturación

2.9.1. Zona de aireación

La zona de aireación está compuesta por tres franjas: La del agua del suelo, la intermedia y la capilar (Menderey, 2005).

En la franja del agua del suelo se encuentran tres tipos de agua:

- 1) Agua higroscópica. Esta es el agua absorbida por el suelo, forma películas delgadas en torno a las partículas del suelo.
- 2) Agua higroscópica. Es el agua que el suelo absorbe y forma películas muy delgadas en torno a las partículas.
- 3) Agua capilar. Se encuentra en las grietas del suelo debido a fenómenos de capilaridad, esta es el agua que las plantas aprovechan.
- 4) Agua libre o de gravedad. Esta agua se mueve por efecto de la gravedad, una vez satisfecho el déficit de humedad del suelo.

La franja intermedia tiene un espesor desde cero hasta varios metros; ésta comunica a la franja del agua del suelo con la capilar, se debe a fuerzas higroscópicas, capilares y la fuerza de gravedad. La franja capilar se puede definir como la capa humedecida por el agua que asciende de la zona de saturación. El agua en la zona de aireación es llamada agua suspendida, siendo ésta el agua infiltrada que desciende a la zona saturada.

2.9.2. Zona de saturación

El movimiento del agua en la zona de saturación es más lento debido a que los poros están ocupados por agua, de esta zona es de donde se obtiene el agua que se utiliza para las diferentes actividades en la superficie.

La capa saturada es llamada también como manto freático, y la parte superior es la zona freática, es decir, el límite de la zona libre del agua que ocupa esta región, que generalmente, sigue generalmente las ondulaciones presentes en el terreno. Al agua que alcanza a esta zona se le conoce como agua freática.

2.10. Movimiento del agua en el suelo

Gil (2002) hace mención del movimiento del agua a través del interior del perfil del suelo, este se debe a las características que presenta el sistema poroso. “El flujo del agua es regido por tres factores: factor hidráulico, factor gravitacional y

el factor de capilaridad del suelo” (Gil,2002). La conductividad hidráulica y la sortividad se encargan del movimiento del agua en el suelo no saturado.

El agua se transmite solamente mediante poros, el flujo de agua que circula es proporcional al diámetro de los poros, disminuye acorde los diámetros se van reduciendo, la velocidad disminuye como parte del efecto geométrico, y aumenta para los pequeños poros, debido a que el efecto de absorción es baja las moviidades de las moléculas del agua se encuentran adheridas a las partículas sólidas. Cuando la cantidad de humedad va en disminución, el potencial mátrico disminuye y la conductividad tiende a bajar más rápido.

Una porción del agua de lluvia y de riego se infiltra en el suelo, si el contenido de humedad es bajo, el agua infiltrada se suspende en un cierto espesor de suelo y obstruye la infiltración a mayor profundidad, hasta alcanzar el límite mayor de humedad en la capa superior. Es entonces cuando actúan los fenómenos de efectos opuestos: la transpiración y evaporación disminuyen la humedad del suelo; y las nuevas lluvias y riegos la aumentan. Si las aportaciones de agua son mayores a la que se extrae, el agua en exceso se infiltra cada vez a mayor profundidad, dejando los estratos de suelo que atraviesa con un contenido mayor de humedad (Coras, 2006).

De esta forma se alcanza un estrato impermeable, o poco permeable, que permita que el agua pase a una menor velocidad que a la que llega de las capas superiores. En estos escenarios, el suelo que se encuentra sobre el estrato impermeable se satura con las nuevas adiciones de agua que ocupan todos los poros del suelo. La velocidad del movimiento de agua en el suelo está gobernada por las fuerzas de gravedad y capilaridad, o ambas, y por la permeabilidad del suelo.

Mediante la infiltración el agua se mueve hacia el manto freático, posteriormente, el movimiento lento que alcanza al llegar a la zona de saturación se le conoce como percolación.

Menderey (2005) indica que las formaciones geológicas se pueden clasificar a partir de su aptitud para contener y transmitir el agua a través de su masa y éstos reciben diferentes nombres:

- **Acuíferos.** Son formaciones que permiten que el agua pueda moverse a través de ellas bajo condiciones habituales y que son capaces de proporcionar por gravedad o por bombeo en la cantidad requerida.
- **Acuicierres o acuitardos.** Son formaciones idóneas para guardar agua, sin embargo, son incapaces de transmitir en cantidades suficientes para su captación o formación de manantiales.
- **Acuífugos.** Son formaciones impermeables que no pueden absorber ni transmitir agua.

Los pueden clasificar los acuíferos de la siguiente manera: libres, confinados y semiconfinados.

Los acuíferos libres también conocidos como acuíferos confinados, abiertos, freáticos, se presentan cuando no existe una delimitación de parte superior en el manto freático por un estrato impermeable. Los acuíferos confinados se alimentan del agua proveniente de un manto en donde el estrato limitante superior o ambos estratos ascienden hasta la superficie. El agua confinada es aquella que cuenta con una presión que le permite ascender a cierto nivel cuando se presenta alguna fractura o perforación que llega hasta el acuífero confinado. Se le conoce como presión hidrostática a la presión que causa tal ascenso y como superficie piezométrica o superficie de presión al nivel al cual llega esta agua sin ser bombeada. Es llamado nivel estático al nivel de un punto cualquiera de las superficies freática y piezométrica sin necesidad de bombear el agua. El agua es ascendente cuando la superficie piezométrica se encuentra debajo del terreno y brotante cuando se encuentra arriba de la superficie (Menderey, 2005).

2.11. Movimiento del agua en los medios porosos no saturados

Tobón (2003) menciona que para el estudio de la hidrología en una zona vadosa es importante considerar los parámetros físicos e hidráulicos que lo rigen:

Parámetros físicos

- **Textura:** se define mediante la distribución, el tamaño y la forma que tienen de las partículas del suelo. La textura determina la capacidad de aireación, retención de humedad, distribución de raíces, infiltración, y la conductividad hidráulica del suelo.
- **Estructura:** Indica el desarrollo de los suelos y es la forma en que se encuentran los agregados.
- **Densidad aparente:** Es muy importante ésta característica, puesto que permite conocer el volumen que utilizan las partículas del suelo y los espacios varios que podrían ser utilizados por agua.
- **Porosidad:** Indica el volumen relativo de los poros del suelo.
- **Porosidad efectiva:** Es el porcentaje de los poros interconectados que permite que haya circulación de fluidos, es considerado como el volumen poroso que se encuentran conectados entre sí.

Parámetros hidráulicos

- **Humedad:** La humedad se rige a partir de las propiedades físicas que presenta el suelo, de ella van a depender la tasa de infiltración y la capacidad para transmitir el agua infiltrada o conductividad hidráulica (Hillel, 1998)., siendo este el eje central para poder determinar la hidrología de la zona vadosa.
- **Infiltración:** El agua puede moverse en diferentes direcciones: vertical, horizontal y radial, la infiltración es la forma en que el agua transpasa las capas del suelo.

- Retención de humedad: El contenido del agua en el suelo se mide como carga de presión positiva cuando se encuentra saturado y negativa o de succión cuando no está saturado (Russell, 1995). Cuando este valor se grafica con respecto a la humedad se alcanza una curva de retención de humedad del suelo o curva característica. Esta curva varía para los suelos debido al fenómeno de histéresis.

El estudio del movimiento del agua en los medios porosos no saturados es una temática de gran interés ya que en la mayoría de los casos la entrada del agua en los acuíferos se produce a través de los mismos. El movimiento del agua en medios no saturados no es solo inducido por esfuerzos gravitatorios, sino que otros esfuerzos tales como los capilares y de adhesión juegan un papel, incluso dominante y los esfuerzos osmóticos, electrosmóticos y termosmóticos, etc. (Tobón, 2003). En el medio no saturado existen dos fases fluidas: aire y agua y el aire que contiene vapor de agua que se forma o se condensa según las condiciones. Todo ello unido a la variación de las propiedades hidráulicas con la humedad del terreno y a los fenómenos de histéresis, hace que el estudio sea realmente dificultoso. “El movimiento del agua en la zona vadosa sucede en tres fases: infiltración, redistribución y drenaje; el drenaje se también se conoce como filtración eficaz o percolación profunda” (Custodio y Llamas, 1983)

2.12. Movimiento del agua en el medio saturado

El movimiento del agua en los suelos sucede tanto en sentido vertical como horizontal, esto va a depender de las condiciones de humedad. En condiciones saturadas se presentan por debajo del nivel freático, el movimiento predominante del agua suele ser horizontal, y en sentido vertical es menor proporción.

El flujo saturado se presenta cuando los poros están llenos de agua. El parámetro principal para predecir el flujo saturado es la conductividad hidráulica saturada. (Gabriels, *et al.*, 2011).

2.12.1. Ley de Darcy

La ley de Darcy se refiere a la relación entre la cantidad o la velocidad de flujo del agua, la permeabilidad del acuífero y el gradiente piezométrico (o gradiente hidráulico).

“El caudal y la velocidad del flujo, según la ley de Darcy van a depender de la permeabilidad k del material, se expresa en metros lineales sobre segundo o unidades homólogas y de las propiedades del fluido” (Duque, 2003).

2.12.2. Cálculo del flujo subterráneo

Un flujo subterráneo se puede calcular con la ecuación de Darcy (Freeze y Cherry, 1979), a partir de los desniveles piezométricos. Conociendo las dimensiones de la celda que se delimita entre curvas equipotenciales y líneas de flujo, y con la transmisividad, se calcula el caudal de agua que fluye en la unidad de tiempo.

Se calcula el volumen de agua que fluye en la unidad de tiempo, apoyada en la aplicación de la Ley de Darcy:

$$V = K \frac{h}{L} = Ki$$

Donde:

V = velocidad aparente o de Darcy (m/s)

h = pérdida de carga en la distancia L (m)

i = Gradiente hidráulico (adimensional)

K = coeficiente de permeabilidad (m/s)

Con la expresión anterior, se puede cuantificar el caudal de flujo que circula a través de una sección, es decir, el canal de flujo, que está limitada por dos líneas de flujo y dos curvas equipotenciales, en la forma siguiente:

$$Q = Av = KA \frac{h}{L}$$

Donde:

A = área de flujo (m²)

Utilizando el concepto de transmisividad, la expresión anterior queda como:

$$Q = TBi$$

Donde:

Q = caudal (m³/s)

T = transmisividad de la capa acuífera (m²/s)

B= ancho de celda(m)

i = gradiente hidráulico (adimensional)

2.12.3. Parámetros hidráulicos

Los parámetros de flujo de agua subterránea se rigen mediante tres componentes del ambiente hidrogeológico: topografía, geología y clima (Tóth, 2000).

“La energía potencial y el gradiente hidráulico rige el movimiento del agua subterránea. La forma básica de los sistemas de flujo surge del concepto de la continuidad hidráulica dentro de una cuenca unitaria dónde la zona de recarga se define con un flujo descendente, la zona de tránsito con un flujo horizontal y la zona de descarga ascendente” (Tóth, 1995)

Porosidad

La porosidad de una roca o suelo, es la propiedad que le confiere la presencia de poros, fisuras, intersticios, etc. La porosidad de un medio depende de varios factores. La porosidad es igual al volumen de vacíos sobre el volumen total de la muestra, expresada en fracción decimal o como porcentaje (Custodio y

Llamas, 1983), y la porosidad efectiva es el volumen de agua que puede drenar de una muestra saturada sobre el volumen total de la muestra (Monsalve,1999).

Tabla 1. Porosidad eficaz de materiales naturales.

Material	Porosidad eficaz %		
	máx	mín	Media
Arcilla arenosa	12	3	7
Arena fina	28	10	21
Arena media	32	15	26
Arena gruesa	35	20	27
Arena con grava	35	20	25
Gravas finas	35	21	25
Gravas medias	26	13	23
Gravas gruesas	26	12	22

(Custodio y Llamas, 1983).

La arena y la arcilla son porosas, igual que una arenisca que se cementa mal o es roca fracturada o con planos de disolución, puesto que en el seno de la roca se pueden encontrar espacios vacíos; la porosidad va a variar con la dimensión de los poros y el grado de cohesión de los minerales que lo limitan.

Los poros constituyen del 1 al 45% del volumen total de una roca esto se determina por la relación entre el volumen utilizado por los poros y el volumen total del cuerpo, en este caso roca. Si los granos están uniformes la porosidad no depende del tamaño, pero sí de la forma en que estén arreglados (Duque, 2003).

Se puede diferenciar entre porosidad primaria y porosidad secundaria; la primera se refiere a los espacios que existen entre las partículas del material, es decir, los espacios entre los granos y la porosidad secundaria se refiere a los espacios ocasionados por el fracturamiento o por la presencia de planos de disolución dentro del material (Duque, 2003).

La relación que existe entre la capacidad de almacenaje y el movimiento del agua en los suelos, junto con la porosidad es evidente y primordial. Sin embargo, no solo la cantidad total de poros dentro del sólido especifica el comportamiento hídrico del suelo, sino también y en diversos casos de manera predominante, las principales características del sistema poroso: forma, tamaño y distribución.

Permeabilidad o conductividad hidráulica (K)

Werner, 1996 define la permeabilidad (conductividad o conductividad hidráulica) como la capacidad de un acuífero para conducir agua, esta depende de la composición granulométrica del acuífero de poros, es decir, gravas, arenas y la mezcla de ambos con condiciones de limo. Cuantitativamente su valor está dado por el coeficiente de permeabilidad de Darcy.

La permeabilidad intrínseca de una roca es una medida de su capacidad para permitir que se desplace un fluido. La permeabilidad depende del grado de conexión entre los poros y el tamaño e irregularidad de los canales resultantes, se expresa en unidades de área, el darcy ($1 \text{ darcy} = 0.987 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$) es la unidad convencional de la permeabilidad. Esta manera de definir la permeabilidad no hace referencia a la geometría interna del espécimen, se relaciona únicamente con la capacidad de hacer pasar el fluido bajo presión sin consideración de los caminos de percolación de las gotitas individuales (Robison, 1990).

Tabla 2. Permeabilidad de sedimentos.

Sedimentos	Permeabilidad (darcy)	
Grava	$10^3 - 10^5$	Muy alta
Arena	$1 - 10^3$	Alta
Limo	$10^{-4} - 1$	Media
Arcilla	Menos de 10^{-4}	Baja

Transmisividad (T) y caudal específico (q)

La transmisividad es la capacidad del medio acuífero para transmitir agua en toda su altura o, en otras palabras, es numéricamente igual al caudal que atraviesa una faja de base unitaria y altura del espesor del acuífero bajo un gradiente hidráulico unitario (Monsalve, 1999).

Este coeficiente de transmisividad (T) de un acuífero es igual al producto de la permeabilidad (K) por la altura del acuífero (b).

$$T = Kb$$

T= Transmisividad en m²/s

K= Permeabilidad en m/s

b= espesor del acuífero en m

Coeficiente de almacenamiento

Al producirse una diferencia en el nivel del agua dentro de un acuífero saturado, o una unidad confinada, cierta cantidad de agua se puede almacenar o liberar. El coeficiente de almacenamiento (S), se puede definir como el volumen de agua, por unidad de área y cambio en altura de agua, que una unidad permeable absorberá o liberará desde almacenamiento, el coeficiente de almacenamiento es adimensional.

Gradiente hidráulico

El gradiente hidráulico es la variación del potencial Δh que se da en una distancia Δl a lo largo del acuífero, donde i es adimensional.

$$i = \Delta h / \Delta l$$

Donde:

Δh = variación de potencial.

Δl = distancia recorrida por el agua.

El potencial hidráulico es la energía que tiene el agua en virtud de su altura, presión y movimiento, éste permite que el agua se desplace dentro de un acuífero hacia posiciones de menor energía.

2.13. Zona de recarga

Donde comienza a formar parte de las reservas subterráneas se define como entrada de agua hacia la zona saturada, presentándose de dos formas, mediante un movimiento descendente del agua ocasionado por la gravedad, y posteriormente en movimiento horizontal del flujo mediante las condiciones hidráulicas que conforman las capas en un perfil de suelo (Balek, 1988).

2.14. Factores que influyen en la recarga

Las principales fuentes de agua que pueden producir recarga del manto freático son: precipitaciones, riego y escurrimiento subterráneo (Coras, 2006).

El principal factor para la recarga de los mantos freáticos es el régimen de precipitación y la evaporación activa funciona como un regulador de descarga de forma natural. Por otro lado factores como la topografía y la permeabilidad que presentan los diversos horizontes de suelo de una región pueden contribuir en agravar o atenuar los problemas.

La tasa de recarga va a depender no solamente del clima, sino también de la velocidad de infiltración, ya que el agua de lluvia infiltrándose rápidamente se encuentra fuera del escurrimiento superficial, así como de la evaporación y evapotranspiración.

2.14.1. Infiltración

La infiltración está relacionada con la recarga de acuíferos, su vulnerabilidad por contaminación y con el escurrimiento superficial, éste último puede ocasionar erosión del suelo. El primer paso para el uso de modelos hidrológicos que

permitan predecir el movimiento del agua es la determinación de parámetros hidráulicos en la zona no saturada, la asertividad y la conductividad hidráulicas son algunos de ellos. (Landini, *et al.*, 2007)

El proceso de infiltración es un componente importante del ciclo hidrológico, que se define como la entrada de agua hacia abajo, en la totalidad o parte del suelo, interviniendo para ello factores como: textura, presencia de costras, compactación, estructura, contenido de humedad, contenido de materia orgánica, tipo de cobertura vegetal, densidad aparente, presencia de grietas y porosidad (Gómez, *et al.*, 2014)

Werner (1996) menciona que la velocidad de infiltración depende de:

- La permeabilidad del suelo
- La capacidad de campo del suelo
- La inclinación de la superficie

Con forme el agua se infiltra en el suelo disminuye la cantidad de agua por unidad de tiempo que se infiltra, siendo mayor al comienzo de la de la aplicación del agua. (Aguilera y Martínez, 1980).

El estado estacionario descendente cuando el flujo de agua es en una sola dimensión (Z) se deduce directamente de la Ley de Darcy

$$q = -K(\theta)\left(\frac{d\theta}{dz} + 1\right)$$

Donde

q= volumen de agua que fluye por unidad de área y unidad de tiempo en la dirección del movimiento

K(θ)= permeabilidad no saturada

θ = potencial matricial en unidades de carga hidráulica

(Linsley, 1981).

Para que la expresión anterior sea aplicable es necesario que la permeabilidad del flujo sea menor que la permeabilidad saturada del suelo; de otra manera se tendrá un flujo saturado (Baver et al., 1980).

2.15. Literatura citada

- Alloway, B.J.1995. Heavy Metals in Soils, second ed. Blackie Academic & Professional, London.
- Arboleda, J. 2000. Teoría y práctica de la purificación del agua. Editorial Mc Graw Hill, Bogotá, p31.
- Balek, J. 1988. Groundwater recharge concepts. In: estimation of natural groundwater recharge. Boston: Ed. Reidel, NATO ASI Series. 3 – 9p.
- Candela, L., & Varela, M. (Eds.). (1993). *La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas: teoría, medición y modelos*. CIMNE.
- Coras-Merino, P. M. (2006). Elementos climáticos y su relación con la fluctuación del nivel freático. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 375-382.
- Custodio E., Llamas R. 1983. Hidrología subterránea. Tomo I y II, segunda Edición. Editorial Omega S.A. Barcelona, España.
- De Miguel, F. C.; 1999, Hidrogeología Aplicada, Editorial “Félix Varela”, La Habana. 453 Páginas.
- De Miguel-Fernández, C., & Vázquez-Taset, Y. M. (2006). Origen de los nitratos (NO₃) y nitritos (NO₂) y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas. *Minería y Geología*, 22(3), 9.
- Escobar-Villagrán, B. S., & Palacios-Vélez, Ó. L. (2012). Análisis de la sobreexplotación del acuífero Texcoco, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(2), 67-84.
- Frutuoso O. T., (2017), Estimación de carbono orgánico en mantillo en zonas forestales del Estado de México, con énfasis en el municipio de Texcoco, Tesis, Estado de México.
- Gil, R. (2002). El comportamiento físico-funcional de los suelos. *INTA-El Sitio Agrícola–Artículos. Instituto de Suelos. INTA Castelar. Disponible desde internet< www.elsitioagricola.com/a.../>[Citado 10 feb. 2001]*.
- Harrison SL, Nelder R, Hayek L, MacKenzie IF, Casemore DP, Dance D, 2002. Managina large outbreak of cryptosporidiosis: how to investigate and when to decide to lift a ‘bol water’ notice. *Commun Dis Public* 5(3):230-239.
- Henningman RD, 1973. La contaminación del agua. En origen y control de la contaminación ambiental. Capítulo 4. Ed Maurice A Strabbe.
- Hernández J. Z. y Téllez P. O (2016), Actualización de la red de monitoreo piezométrico y análisis de la calidad de agua del acuífero Texcoco (1507), Tesis, Estado de México.

- Izquierdo, G., Arellano, V. M., & Aragón, A. (2008). *Características mineralógicas y microtermométricas del yacimiento geotérmico de Los Humeros, Pue., México*. Geotermia, 2.
- Maderey Rascon, L. E., & Román, J. (2005). *Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico*. UNAM.
- Monsalve S. G. (1999), Hidrología en la Ingeniería, Colombia, 2da edición.
- PNUMA (2008). Water Quality for Ecosystems and Human Health. 2ª ed. PNUMA, ERCE, UNESCO
- Reif SJ, Hatch MC, Bracken M, Holmes LB, Schwetz BA, Singer PC, 1996. Reproductive and developmental effects of disinfection by products in drinking water. Environ Health Perspect 104(10):1056-1061.
- Robison E. S. (1990), Geología Física Básica, México, Editorial Limusa.
- Shanker, A.K., Cervantes, C, Loza-Tavera, H., Avudainayagam, S. 2005. Chromium toxicity in plants. Environment International 31, 739– 753
- Tobón, J. I. (2003). *Hidrología de la zona vadosa en la terraza de Llanogrande (Rionegro–Antioquia)* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín).
- Velázquez-Machuca, M. A., & Pimentel Equihua, J. L. (2012). *Calidad del agua potable en la Ciénaga de Chapala, Michoacán, México*. Tecnología y Ciencias del Agua, 3.

3. ANTECEDENTES DEL SUELO DEL EX – LAGO DE TEXCOCO

3.1. Geología (Ex – Lago Texcoco)

La composición geológica del suelo pertenece a la era del cenozoico y es de sistema cuaternario, es de clase lacustre y de andesita formados por arcillas y sales producto de la erosión de las rocas preexistentes de la cuenca del Valle de México. También es posible encontrar algunas rocas de origen ígneo extrusivo pertenecientes a la era del cenozoico del sistema del Neógeno. Los suelos del Ex - Lago de Texcoco son el resultado de la alteración de las rocas ígneas, éstos son de origen aluvial – lacustre formados a partir de los sedimentos (Gutiérrez, 1998).

Los tipos de suelos que se encuentran en esta área son: Solonchak, Vertisol y Feozem; Solonchak es un suelo salino, constituido por material no consolidado, presenta una capacidad de utilización muy reducida, Vertisol es un suelo constituido por sedimentos con una elevada proporción de arcillas esmécticas, los vertisoles se vuelven duros en la estación seca, generando profundas grietas y muy plásticos en la estación húmeda; Feozem es un suelo color oscuro, con alto contenido en materia orgánica (Villanueva, 2018).

Desde el punto de vista geológico, la zona del Ex - Lago de Texcoco forma parte de los denominados rellenos de vaso de la cuenca de México. El suelo está constituido en su parte superior por arcillas lacustres de muy alta compresibilidad subyacidas por clásticos derivados de la acción de ríos, arroyos, glaciares y volcanes (Tamez et al., 1987).

3.2. Composición del suelo del Ex – Lago de Texcoco

Muciño (1997) y Santoyo (1997) reportaron que el subsuelo del Ex - Lago de Texcoco, se compone por arcillas del Tipo 2:1 (esmectitas), éste tipo de arcillas se caracterizan por ser expansivas ya que pueden aumentar o disminuir dependiendo del agua que contengan (Porta et al., 1999); por otro lado

Gutiérrez (1997) señala que existe una dominante presencia de sílice amorfa en forma de esferas opalinas y gel dentro de la fracción arcillosa, “ésta cuenta con una alta capacidad de intercambio catiónico; además el pH fuertemente alcalino del medio, hace que esté en estado soluble”. Gutiérrez et al. (2000) reportaron presencia de estratos endurecidos cementados naturalmente en la ribera del Ex - Lago de Texcoco producto del carbonato de calcio y sílice amorfa.

Existe una presencia de horizontes ricos en carbonato de calcio formados por diversos rasgos calcínicos en los suelos del Ex – Lago de Texcoco, Sin embargo la cantidad de carbonato es más alta en tierras blancas de laderas y montículos a tal grado que ésta formaciones no han sido claramente identificadas.

La acumulación del carbonato en los suelos del Ex – Lago se encuentran estrechamente relacionados con los lechos de aguas salinas, sin embargo, estos están más ligados a los ambientes marítimos ricos en calcio que a la influencia de la escasa precipitación.

El carbonato de calcio fue depositado durante la presencia del Lago de Texcoco formando dos estratos con diferentes morfologías en conjunto con otros sedimentos, los estratos calcínicos formados se clasificaron de a partir mediante la morfología:

- El estrato laminar continuo cubre desde las partes planas del Ex – Lago hasta la parte superior de los montículos formando una lámina continua y homogénea de grandes espacios de tierras blancas. Éste se encuentra a partir de 50 cm de profundidad en tierras blancas y después de 70 cm en tierras de barro y cacahuetudas donde éstas últimas siempre se relacionan con las primeras (De Paepe, 1991).
- Estrato nodular formado por nódulos calcínicos con diámetros de 1 a 2 mm de color blanco ubicados en forma cementada entre los 20 y 40 cm debajo de las tierras blancas y no cementado a partir de 50 cm en

tierras de barro y cacahuétudas. Una de las características de éste tipo de estrato es la discontinuidad litológica que presenta un contraste con los estratos suprayacentes arcillosos comunes en la región.

3.3. Antecedentes del Ex – Lago de Texcoco

El crecimiento poblacional ha ejercido una gran presión sobre la superficie del Ex – Lago de Texcoco, priorizando sus potenciales como soporte de infraestructura urbana como lo es el depósito de desechos sólidos urbanos en el Bordo Poniente (Jazcilevich, et al., 2015). La contaminación del Ex – Lago de Texcoco con desechos sólidos o basura ocurre no solo alrededor del Ex – Lago, sino también a lo largo de las carreteras y de los ríos en el Municipio de Texcoco.

La construcción del que canal que se originó en la orilla occidental del Lago de Texcoco llegando hasta el Túnel de Tequixquiac Núm.1, se realizó como uno de los proyectos más completos de 1857, este canal se descargaba en el Río Tula, Posteriormente, mediante las obras de drenaje artificial, se logró la construcción del Tunel Tequixquiac Núm 2. La desecación paulatina del Lago de Texcoco, fue el resultado de estos proyectos, ocasionando que el lecho del Lago quedara expuesto y sujeto a la contaminación de aguas residuales provenientes de los ríos Churubusco, La Compañía y Los Remedios (Ezcurra, 1990; Cruickshank, 2007).

Se tiene una descripción de la influencia de los municipios de Texcoco y Atenco en las condiciones actuales del Ex – Lago de Texcoco:

Los ríos de la vertiente de la zona occidental de la Sierra nevada fluían hacia el Lago de Texcoco, que forma parte de la cuenca del Valle de México al igual que el Municipio de Texcoco, actualmente el municipio tiene cinco ríos, éstos contaminados a causa de Plomo (Pb), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO₂) y diversos hidrocarburos, entre demás contaminantes (Jazcilevich, et al., 2015). Como producto del deshielo y de las precipitaciones

se forman los ríos en la parte alta de la Sierra Nevada, pasando por las localidades donde son utilizados como parte de los receptores de drenaje, ocasionando que, al llegar a la cabecera municipal y los poblados de la zona baja, los ríos tengan una mayor contaminación. Por otro lado, la concentración de basura que acompaña las aguas residuales y el drenaje domestico del municipio de Texcoco llegan a los ríos y canales, curzan de este a oeste y finalmente desembocan en el Ex – Lago de Texcoco. Esta contaminación se presenta tanto en las comunidades pequeñas como en las colonias céntricas del municipio (Moreno, 2010).

Un estudio realizado por Schlam *et al.* (2006) a lo largo del Río Texcoco encontró el cloro como uno de los iones más activos en el río, debido al uso de jabones y detergentes en las comunidades cercanas al río, en este muestreo encontraron un alto contenido de nitratos lo cual indica que el agua es de baja calidad. Guzmán *et al.*, (2007) realizaron muestreos en el Río Texcoco a la salida de la cuenca hacia el Lago de Texcoco encontrando valores de N total que oscilaron entre 21 y 60 mg/l, valores de fósforo total de entre 5 a 18.4 mg/l y aguas de salinidad modera como le reportaron Navarro y Pérez (2005).

3.3.1. Principales residuos sólidos municipales

Los principales transportadores de metales pesados de origen domestico son las aguas residuales en las ciudades, los vertidos domésticos llevan una amplia gama de metales dentro de las excreciones humanas, agua de lavado, resto de alimentos, etc. (Förstner y Wittmann, 2012).

Los residuos sólidos municipales generalmente incluyen desechos de los hogares y los generados en pequeños comercios e industrias, así como los residuos de mercados y jardines. De los aproximados 27 tipos de residuos sólidos más comunes, 15 corresponden a residuos de origen orgánico que pueden ser biodegradados, algunos ejemplos son: residuos alimenticios, de jardinería, algodón, cartón, papel, hueso, fibra vegetal y otros. Los compuestos

sintéticos y de materiales no biodegradables se pueden clasificar en: vidrio, fibra sintética, material de construcción, material ferroso, pañales desechables, poliuretano, poliestireno, plástico, lata, loza y cerámica, entre otros (Zúñiga, 1999).

3.3.2. Principales residuos sólidos industriales

Los tipos y características de los residuos sólidos industriales dependen de la fuente o tipo de industria. Las aguas residuales provenientes de las industrias son las principales fuentes de metales pesados, estos se vierten en los cauces fluviales. La mayoría de estos vertidos no cuentan con un proceso de depuración o tratamiento adecuado. La industrialización y la urbanización presentan un mayor riesgo de contaminación ocasionada por metales pesados, principalmente por los sedimentos anaerobios son ricos en sulfuros esto favorece la retención y acumulación de metales (Tam y Yao, 1998).

3.4. Conclusiones

Los lodos y suelos salinos transportados del Ex – Lago de Texcoco, hacia los socavones ubicados en Tlaminca y Tequexquinahuac, contienen los componentes que llevan los ríos de Texcoco, como son Plomo, dióxido de azufre, monóxido de carbono, diversos hidrocarburos entre otros contaminantes, más los residuos sólidos municipales e industriales que han sido depositados en el Ex – Lago de Texcoco, considerando la cercanía del relleno sanitario del bordo poniente, y los residuos sólidos que por la cercanía de la Autopista Peñon – Texcoco hayan podido generar en esta zona.

3.5. Literatura citada

- Cruickshank, G., 2007, Proyecto lago de Texcoco: rescate hidroecológico: México, D.F., Comisión Nacional del Agua-SEMARNAT, 140 p.
- De Paepe, P. 1991. Principles of petrology. International Training Center. Ghent Belgium.
- Ezcurra, E., 1990, De las chinampas a la megalópolis: el medio ambiente en la Cuenca de México: México, Fondo de Cultura Económica, 119 p.
- Förstner, U., & Wittmann, G. T. (2012). *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer Science & Business Media.
- Gutiérrez C., Ma. del C. 1997. Los suelos de la ribera oriente del Ex - Lago de Texcoco (Macro y micromorfología). Tesis de Doctorado. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Gutiérrez C., Ma. del C., C.A. Ortiz S. y G. López A. 2000. Caracterización de los estratos lacustres cementados en el Ex - Lago de Texcoco. pp. 108-125. *In: La edafología y sus perspectivas al siglo XXI*. Tomo I. R. Quintero L., T. Reyna T., L. Corlay Ch., A. Ibáñez H. y N. García E. (eds.). Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Gutiérrez Castorena, M. D. C., Stoops, G., & Ortiz Solorio, C. A. (1998). Carbonato de calcio en los suelos del Ex - Lago de Texcoco. *Terra Latinoamericana*, 16(1).
- Guzmán-Quintero, A., Palacios-Vélez, O. L., Carrillo-González, R., Chávez-Morales, J., & Nikolskii-Gavrilov, I. (2007). La contaminación del agua superficial en la cuenca del río Texcoco, México. *Agrociencia*, 41(4), 385-393.
- Jazcilevich Diamant, A., Siebe, C., Estrada, C., Aguillón, J., Rojas, A., Chávez García, E., & Sheinbaum Pardo, C. (2015). Retos y oportunidades para el aprovechamiento y manejo ambiental del ex lago de Texcoco. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 145-166.
- Moreno Sánchez, E. (2010). El aeropuerto y el movimiento social de Atenco. *Convergencia*, 17(52), 79-96
- Muciño C., R. 1997. Cimentaciones superficiales sobre suelos expansivos. Vector de Ingeniería Civil 5. Federación del Colegio de Ingenieros Civiles de la República Mexicana. México D.F.
- Navarro-Garza, H., y M. A. Pérez-Olvera, (2005). Caracterización inorgánica del agua del río Texcoco, entre épocas del año y años. *Terra* 23: 183-190.

- Porta, J., M. López-Acevedo y C. Roquero. 1999. Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente. 2a edición revisada y ampliada. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Santoyo V., E. 1997. Inyección del subsuelo del Palacio de Bellas Artes. Un caso injustamente desvirtuado. Vector de Ingeniería Civil 4: 18-30. México, D.F.
- Schlam, F. H., Salgado, G. M., López, F. P., Díaz, O. M., Serrano, F. R., & Merino, P. C. (2006). Monitoreo de la calidad del agua en el río Texcoco mediante sensores selectivos de iones. *Agrociencia*, 40(3), 277-287.
- Tam, N.F., Yao, M.W., (1998). Normalisation and heavy metal contamination in mangrove sediments. *The Science of the Total Environment* 216, 33 -39.
- Tamez E., Santoyo E., Mooser F. y Gutiérrez C. (1987). Manual de Diseño Geotécnico, COVITUR, México D F, 1:9-12
- Villanueva Portuguez R. M. (2018), Distribución espacial de la salinidad en suelos del área de influencia del Ex – Lago de Texcoco, Tesis 2018, Chapingo México.
- Zúñiga, F. B. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados* (Vol. 1). Uady.

4. CALIDAD DEL AGUA POTABLE EN LAS COMUNIDADES ALEDAÑAS A LAS MINAS DE TLAMINCA Y TEQUEXQUINAHUAC

RESUMEN

El deterioro del recurso hídrico y su calidad está asociado a diversos factores, principalmente debido a la filtración del agua provenientes de residuos domésticos, industriales, también agrícola y ganadera, junto con los residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios o tiraderos clandestinos cerca de las áreas de recarga de acuíferos. El monitoreo de la calidad del agua es de suma importancia ya que permite tomar medidas preventivas de posibles epidemias causadas por contaminación que generen riesgo a la salud del ser humano, o bien, medidas de remediación. En este estudio se muestrearon 11 pozos cercanos a las minas de arena donde se ha depositado el escombro proveniente del Ex – Lago de Texcoco Estado de México, ubicados en las localidades de la parte nororiental del acuífero de Texcoco, con la finalidad de describir la calidad actual del agua, para ello se determinaron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos; los pozos muestreados presentan una buena calidad del agua, no existe presencia de coliformes fecales y los parámetros fisicoquímicos se encuentran dentro de los límites permisibles.

Palabras clave: Calidad del agua, límite permisible, contaminación, salud humana.

4.1. Introducción

De las principales fuentes de donde se toma el agua para consumo humano están los acuíferos, estos son formaciones geológicas que permiten el almacenamiento de agua y sirven también como depósito y reserva. La mayor parte de los acuíferos son grandes extensiones, éstos se recargan principalmente mediante el aporte de aguas de lluvia, corrientes superficiales y lagos tienen infiltración en el suelo. En un acuífero, el agua escurre por efecto de la gravedad a partir de las zonas de recarga hasta las de descarga. La explotación se efectúa mediante el bombeo en pozos (Price, 2007). Generalmente, debido a su bajo contenido de materias nutritivas, los acuíferos albergan sólo a ciertos organismos, sin embargo, los principales elementos que contaminan los acuíferos son las actividades humanas y el crecimiento urbano

(Ramírez et al., 2009). Para evaluar los cambios que el agua subterránea pudiera tener respecto a su calidad, se emplea una serie de parámetros físicos, químicos y biológicos, también conocidos como indicadores de calidad del agua (Nissen, *et al.*, 2000).

Debido a los cambios de las condiciones hidrológicas y geológicas de cada lugar, la calidad del agua subterránea varía para cada sitio, puede tener un contenido alto de metales, generalmente por disolución de los componentes del suelo se encuentran hierro y manganeso.

La calidad del agua subterránea varía de un sitio a otro debido a los cambios respecto a las condiciones hidrológicas y geológicas de cada lugar; puede obtener alto contenido de metales generalmente hierro y manganeso por disolución de componentes del suelo en el que se encuentran contenidos.

Es importante recordar que el acuífero no es renovable, es decir, si se tiene una explotación mayor a la de recarga, puede llegar al punto de agotarse y/o deteriorar su calidad (Price 2007). La principal causa de la alteración de los mecanismos que se encargan de la recarga de los acuíferos es la actividad humana sobre la superficie, esto ocasiona el cambio de la distribución, tasa, frecuencia y calidad del agua de recarga (Foster, *et al.*, 2003).

El interés de la microbiología del agua subterránea se ha incrementado en México debido al aumento de la demanda de esta fuente, ya que es imprescindible que no exista riesgo a la salud por su uso (Ramírez et al., 2009). Para la calidad del agua, su uso y consumo humano es de gran importancia las características microbiológicas, al no estar asociado con efectos inmediatos y agudos se considera como contaminación química (Higuera et al., 2000). Conocer los mecanismos y diagnosticar tales cambios resulta muy importantes para lograr una evaluación del peligro de contaminación del agua subterránea (Foster et al., 2003). Para controlar y detectar puntos de contaminación en aguas superficiales y subterráneas es de suma importancia el monitoreo de la

calidad del agua (Gray, 1999). El objetivo de este estudio es describir la calidad actual del agua potable de la zona nororiental del acuífero de Texcoco.

4.2. Materiales y métodos

Para conocer la calidad actual de los pozos de las comunidades de Texcoco, aledañas a las minas de Tlaminca y Tequexquinahuac se llevó a cabo la siguiente metodología.

Se seleccionaron 11 pozos aledaños a las minas donde se ha depositado suelo salitroso proveniente del Ex – Lago de Texcoco.

Tabla 3. Pozos muestreados.

No.	Pozo
1	Sn Miguel Tlaixpan
2	Molino de flores
3	Sn. Nicolás Tlaminca
4	Colonia Cooperativo
5	Sn Luis Huexotla
6	Xala (Huexotla)
7	Zootecnia (Chapingo)
8	Yucateco (Chapingo)
9	Colonia de profesores (Chapingo)
10	Fraccionamiento ISSSTE (Emiliano Zapata)
11	Cocoyoc

4.2.1. Fase de campo

Siguiendo la NOM-230-SSA1-2002, se realizó el procedimiento sanitario de los envases colectores de las muestras y para la correcta toma de muestras. Para la preparación de los reactivos a utilizar en el análisis bacteriológico se consideró la NOM-112-SSA1-1994.

Se tomaron las 11 muestras de los respectivos pozos en días diferentes, de acuerdo a los días en que los poceros encendían las bombas, las cuales se transportaron inmediatamente al Laboratorio del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, para comenzar el análisis bacteriológico y el análisis físico-químico.

4.2.2. Trabajo de laboratorio

Los análisis bacteriológico y físico-químico, se realizaron siguiendo las metodologías de las NOM-112-SSA1-1994 para determinación de coliformes mediante la técnica del número más probable, la NMX-AA-051-SCFI-2001 para determinación de metales por absorción atómica, la NMX-AA-036-SCFI-2001 para alcalinidad, la NMX-AA-072-SCFI-2001 para dureza, la NMX-AA-073-SCFI-2001 para cloruros, la NMX-AA-074-1981 para sulfatos y para fosfatos se utilizó la NMX-AA-SCFI-2000, para nitratos NMX-AA-079-SCFI-2001 y nitritos NMX-AA-099-SCFI-2006.

Análisis bacteriológicos

Los envases a utilizar se lavaron y secaron, posteriormente se esterilizaron en la autoclave, usando la metodología indicada en la NOM-230-SSA1-2002.

Para la preparación de los medios de cultivo: caldo lactosado, caldo lactosado bilis verde brillante, medio EC y agua de dilución, se utilizó la metodología indicada en la NOM- 112-SSA1-1994, una vez preparados y servidos en los tubos de ensaye, se esterilizaron todos los tubos al igual que todo el material a utilizar para sembrar las muestras de agua.



Figura 2. Caldo lactosado y Caldo lactosado bilis verde brillante.

Para realizar el análisis bacteriológico se requirió tomar cada muestra de agua en la mañana y llevarla directamente al laboratorio, esto se realizó para cada pozo muestreado.

Se realizó para cada muestra la prueba presuntiva, utilizando 16 tubos de ensaye con caldo lactosado, para los tubos que después de 24 horas presentaron formación de gas indicando presencia de coliformes totales se realizó la prueba confirmativa. Para las muestras que presentaron ausencia de gas, indicaron una prueba negativa, en decir, una ausencia de coliformes, por lo tanto, el análisis quedó concluido para esas muestras.

Posteriormente la prueba confirmativa se realizó para cada tubo positivo en tubos de fermentación con caldo lactosado bilis verde brillante, después de 24 ± 2 horas los tubos que presentaron formación de gas se consideraron positivos. Los tubos que se consideraron positivos indicaron presencia de coliformes totales y la ausencia de gas en los tubos muestra ausencia de coliformes totales.

Para los tubos que fueron positivos para la prueba confirmativa de coliformes totales se realizó la siembra en tubos de fermentación con el reactivo medio EC para determinar si los coliformes totales pertenecían a coliformes fecales, posterior a 48 horas se obtuvo la formación de gas en los tubos mostrando una prueba confirmativa de la presencia de coliformes fecales y en los tubos con ausencia de gas indicando ausencia de coliformes fecales.

4.2.3. Análisis físicos

Usando los respectivos medidores se tomó pH y conductividad eléctrica de forma directa.

4.2.4. Análisis químicos

Determinación de carbonatos y bicarbonatos

- a) Se tomaron 50 ml de muestra de agua en un matraz, se le agregó 4 gotas de fenolftaleína, si alguna muestra cambió a coloración rosa indica presencia de carbonatos, en caso de no presentar coloración muestra ausencia de carbonatos.
- b) Posteriormente se agregó a la muestra 4 gotas de anaranjado de metilo y se tituló con ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0.05 N hasta observar el cambio de color llegando a color rojizo.
- c) Con el número de mililitros de ácido sulfúrico utilizado se realizaron los cálculos para determinar el contenido de bicarbonatos.

Determinación de cloruros

- a) Se tomaron 50 ml de la muestra de agua en un matraz, se le agregó 10 gotas de cromato de potasio y se tituló con nitrato de plata (AgNO_3) esto se realizó gota a gota pasando del color amarillo de la muestra a un color rojizo.
- b) Con el número de mililitros de nitrato de plata utilizado se realizaron los cálculos para determinar el contenido de cloruros.

Determinación de calcio y magnesio

- a) Se tomaron 50 ml de muestra de agua en un matraz, se le agregó 1 ml de solución amortiguadora de NH_4Cl y NH_4OH , se agitó para tener una muestra homogénea, posteriormente se agregó 0.1gr de negro de Eriocromo.
- b) Se tituló con la solución EDTA 0.01N añadiendo gota a gota, y agitando la muestra hasta obtener un cambio de color de color vino al primer azul que se presente.

- c) Finalmente tomando en cuenta el número de mililitros utilizados de solución EDTA 0.01N se calculó el contenido de dureza total en cada muestra.

Determinación de sodio y potasio

Para poder realizar la determinación de sodio, se tomó en cuenta la conductividad eléctrica y pH de cada muestra para saber si la muestra requería analizarse de forma directa o una dilución con agua destilada. Se tomó la muestra de agua en un matraz, se calibró el flamómetro y se midió directamente los valores de sodio y potasio.

Determinación de sulfatos

Para esta determinación se tomó 50 ml de cada muestra de agua en un matraz, se agregó un gramo de cloruro de bario y se agitó hasta que disolvió correctamente, posteriormente se llevó al fotocolorímetro y se tomó la lectura del aparato.

Determinación de nitrógeno

- Nitritos

Para esta determinación se utilizaron 10 ml de muestra, se adicionó una almohadilla de NitraVer Reagent Powder Pillow. Se disolvió el polvo de la almohadilla moviendo el matraz de forma circular durante un minuto, y se dejó reposar por 20 minutos, cada muestra desarrolló un ligero color rosado, después de los 20 min se tomó la lectura en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 507 nm, seleccionando el programa 2610, se preparó el blanco como referencia, con agua destilada que marcó una lectura de 0.0000 mg/l de $\text{NO}_2 - \text{N}$.

- Nitratos

Se utilizó 10 ml de muestra, se le adicionó una almohadilla de NitraVer 5 Nitrate Reagent Powder Pillow. Se disolvió el contenido de la almohadilla moviendo en forma circular el matraz durante un minuto, se dejó reposar durante 5 minutos, cada muestra tomó un ligero color ámbar. Posteriormente se tomó la lectura en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 500 nm, seleccionando el programa 2530, se preparó el blanco como referencia con agua destilada, para el cual el valor de la lectura fue de 0.0 mg/l de $\text{NO}_3 - \text{N}$.

Análisis de metales

Con ayuda del personal del Laboratorio del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo se realizaron las curvas para medir metales por absorción atómica, en este caso, se tenían las botellas con las muestras de agua y se colocaron de manera directa para la absorción y posteriormente el espectrómetro arrojó el dato del contenido de metales, comparado con la curva del metal requerido.

4.3. Resultados y discusión

Los resultados que se presentan se compararon con los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 de agua para consumo humano, excepto el níquel, éste se obtuvo de EPA (1995).

4.3.1. Determinación de coliformes totales y fecales

La determinación de coliformes totales y fecales fue mediante el método del número más probable, siguiendo la NOM-112-SSA1-1994.

Todos los pozos muestreados para la prueba presuntiva mostraron presencia de microorganismos, pero al ser resembrados para confirmar si se trataba de coliformes totales, el único pozo que mostró presencia de estos fue el del

Molino de Flores, esta muestra se resembró para determinar si había presencia de coliformes fecales, los tubos salieron limpios. Con ello se puede concluir que el único pozo con problemas de coliformes totales es el del Molino de Flores, mientras que el resto de los pozos solo muestran presencia de mésofilos aerobios, esto se le atribuye a que a cada pozo cuenta con un sistema de cloración antes de que el agua sea distribuida.

4.3.2. Concentración de alcalinidad, dureza y cloruros

Tabla 4. Características químicas del agua: alcalinidad, dureza y cloruros.

Pozo	Alcalinidad (mg/l)	Dureza (mg/l)	Cloruros (mg/l)
Sn Luis Huexotla	85	54.0	14.180
Xala (Huexotla)	35	35.0	17.725
Sn. Nicolás Tlaminca	195	200.0	24.815
Molino de Flores	230	145.0	7.090
Sn Miguel Tlaixpan	35	39.5	7.090
Cooperativo	60	53.0	17.725
Col. Profesores (Chapingo)	110	77.0	14.180
Zootecnia (Chapingo)	205	184.0	14.180
ISSSTE (Emiliano Zapata)	35	42.0	10.635
Cocoyoc	60	66.0	14.180
Yucateco (Chapingo)	160	150.0	7.090

Al analizar los resultados obtenidos en cada una de las variables de observación, se encontró que:

La alcalinidad va de la mano con el promedio del pH observado, esto bajo los límites establecidos (400 mg/l), lo que no representa riesgo alguno para el consumo humano.

La concentración de CaCO_3 como dureza total tiene un rango menor de 200 mg/l, esto indica que el agua se considera de blanda a moderadamente dura; se encuentra por debajo de lo establecido por la NOM- 127-SSA-1994 (500 mg/l), los datos presentados por Martínez (2014) para los pozos San Miguel Tlaixpan,

Cooperativo y San Luis Huexotla son menores a los encontrados en la presente investigación. Para el pozo ubicado en el fraccionamiento Emiliano Zapata presenta un aumento de 23 mg/l en 5 años comparando con los valores de Martínez (2014), para el mismo pozo hay un aumento de 5.5 mg/l del año 2018 al 2019 presentado por López (2018).

La concentración de cloruros hallada en las muestras está por debajo el límite permisible (250 mg/l). Los datos registrados para los pozos: San Miguel Tlaixpan, ISSSTE, Cooperativo y San Luis Huexotla muestreados por Martínez (2014) son menores que los datos obtenidos en esta investigación, esto indica que ha ido aumentando la concentración de cloruros con el tiempo, esta información se puede corroborar con los datos que obtuvo Martínez (2014) para el pozo del ISSSTE con un valor de 3.55 mg/l en 2014 con un cambio de 7.08 mg/l del 2014 a 2019, mientras que el valor que muestra López (2018) es de 0.1 mg/l en 2018 con un cambio de 10.53 mg/l en un año, esto indica que hay un aumento a lo largo del tiempo, sin embargo, no es un aumento gradual.

4.3.3. Conductividad eléctrica y pH

Tabla 5. CE y pH de los pozos muestreados.

Pozo	CE ($\mu\text{s/cm}$)	pH
Sn Luis Huexotla	198.8	6.93
Xala (Huexotla)	127.9	6.97
Sn Nicolás Tlaminca	516.0	7.81
Molino de Flores	464.0	7.37
Sn Miguel Tlaixpan	156.0	6.38
Cooperativo	167.0	7.78
Col. Profesores (Chapingo)	330.0	7.04
Zootecnia (Chapingo)	576.0	7.75
ISSSTE (Emiliano Zapata)	169.7	6.58
Cocoyoc	216.0	6.72
Yucateco (Chapingo)	448.0	7.87

Para conductividad eléctrica y pH, los resultados de los pozos están dentro de los límites permisibles, lo cual no afecta ni pone en riesgo la salud humana, no

existe una variación en los datos obtenidos al comparar con los datos obtenidos por Martínez (2016), estos se mantienen en el mismo rango.

4.3.4. Concentración de sulfatos, sodio, potasio y fósforo

Tabla 6. Concentración de sulfatos, sodio, potasio y fósforo.

Pozo	Sulfatos (mg/l)	Sodio (mg/l)	Potasio (mg/l)	Fósforo (mg/l)
Sn Luis Huexotla	4.5	3.7	4.1	0.06
Xala (Huexotla)	4.0	2.7	2.9	0.07
Sn Nicolás Tlaminca	22.0	2.7	10.7	0.13
Molino de Flores	12.1	10.0	2.2	0.03
Sn Miguel Tlaixpan	2.0	16.8	4.0	0.02
Cooperativo	4.9	3.8	2.7	0.07
Col. Profesores (Chapingo)	10.4	11.0	5.9	0.10
Zootecnia (Chapingo)	43.2	12.1	7.3	0.11
ISSSTE (Emiliano Zapata)	3.3	5.8	4.3	0.12
Cocoyoc	3.7	5.7	4.2	0.07
Yucateco (Chapingo)	22.8	9.8	4.8	0.11

La concentración de sulfatos se encuentra por debajo de los límites permisibles según la Norma Oficial Mexicana. Comparando los datos obtenidos por Martínez (2014), en el muestreo realizado en los pozos: ISSSTE, Cooperativo y San Luis Huexotla, existe un aumento de sulfatos en estos pozos, mientras que para el pozo de San Miguel Tlaixpan hay una disminución de 9.4 mg/l; para sodio hay una disminución en los pozos ISSSTE, Cooperativo y San Luis de 13.2 mg/l, 13.2 mg/l y 12.7 mg/l respectivamente, para el pozo de San Miguel Tlaixpan hubo un aumento de 0.6 mg/l de sodio.

4.3.5. Concentración de nitratos y nitritos

Tabla 7. Concentración de nitratos y nitritos (mg/l)

Pozo	Nitratos (mg/l)	Nitritos (mg/l)
Sn Luis Huexotla	0.1	0.019
Xala (Huexotla)	0.1	0.015
Sn Nicolás Tlaminca	1.6	0.017
Molino de Flores	0.0	0.078
San Miguel Tlaixpan	0.0	0.016
Cooperativo	0.0	0.000
Col. Profesores (Chapingo)	0.8	0.016
Zootecnia (Chapingo)	1.3	0.007
ISSSTE (Emiliano Zapata)	0.1	0.017
Cocoyoc	0.2	0.020
Yucateco (Chapingo)	1.1	0.015

Como se puede observar en la tabla de concentración de nitratos y nitritos, la concentración de nitratos es baja, estos se encuentran por debajo de lo establecido en la NOM- 127-SSA1-1994, con el limite permisible para nitratos de 10 mg/l, mientras que la concentración de nitritos el pozo del molino de flores muestra una concentración de 0.078 mg/l mayor a la que establece la norma (0.05 mg/l), siendo este pozo el único con problemas de nitritos, los demás pozos se encuentran con una concentración menor.

4.3.6. Concentración de metales

El contenido de metales se basó en la NOM- 127-SSA1-1994, teniendo como límites permisibles de la siguiente manera.

Tabla 8. Límite permisible para metales en agua potable.

Metal	Límite permisible (mg/l)
Cromo (Cr)	0.050
Cadmio (Cd)	0.005
Cobre (Cu)	2.000
Zinc (Zn)	5.000
Níquel (Ni)	0.010
Plomo (Pb)	0.025

El método utilizado para determinación de metales fue mediante un espectrómetro y el límite de detección es de 0.05 ppm, esto permite explicar que para cuatro pozos muestreados la detección de metales fue nula, tales pozos son: San Luis Huexotla, Xala, San Nicolás Tlaminca y el Cooperativo. Los metales Cadmio y Plomo no mostraron concentración en ninguno de los pozos estudiados.

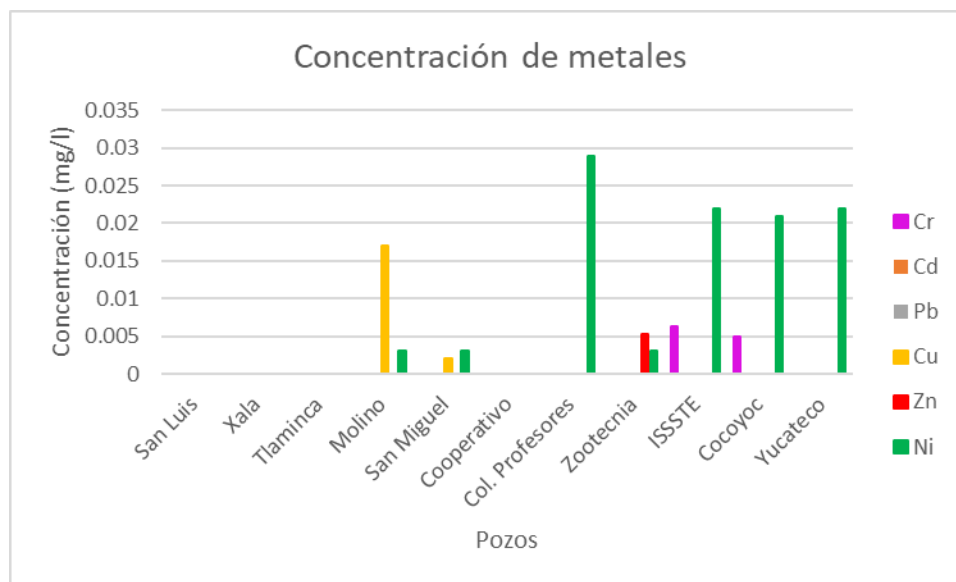


Figura 3. Concentración de metales en los pozos muestreados.

En el pozo del molino de flores y de San Miguel se detectó la presencia del cobre, sin embargo, sus concentraciones son bajas comparadas con el límite permisible. El zinc solo se detectó en el pozo de zootechnia (0.0052 mg/l), sin embargo, no presenta ningún riesgo, puesto que su concentración está por debajo del establecido por la NOM-114-SSA-1995. En los pozos ISSSTE (0.0063 mg/l) y Cocoyoc (0.0049 mg/l) se encontró concentración de Cromo y su valor de concentración es menor al límite permisible para agua potable.

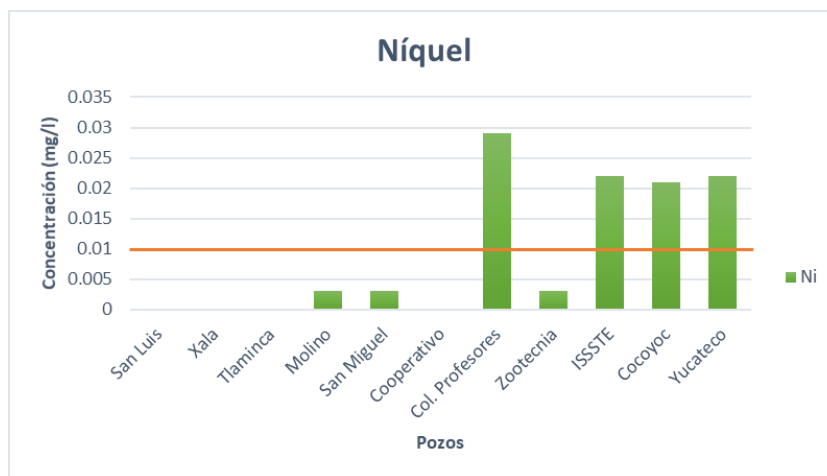


Figura 4. Concentración de níquel.

Mientras que el Níquel se encontró en los pozos Molino de flores, San Miguel Tlaixpan, Zootecnia, Colonia de profesores, ISSSTE, Cocoyoc y Yucateco (Figura 4). Para los primeros tres pozos con una concentración de 0.003mg/l cada uno, el cual se encuentra por debajo del límite permisible (0.01 mg/l), para los pozos Colonia de profesores (0.029 mg/l), ISSSTE (0.022 mg/l), Cocoyoc (0.021 mg/l) y Yucateco (0.022 mg/l), la concentración hallada en las muestras fue mayor de 0.01 mg/l, esto indica que por el metal Níquel no es un agua de buena calidad.

4.4. Conclusiones

No hay presencia de coliformes en ningún pozo muestreado, esto debido a que todos los pozos cuentan con cloración antes de que el agua sea distribuida.

Los resultados obtenidos para estos parámetros analizados excepto níquel, no rebasan los límites establecidos en la normatividad correspondiente, lo que indica que el agua de los pozos muestreados tiene una buena calidad fisicoquímica para uso potable, sin embargo, es necesario tomar medidas que permitan disminuir la concentración de níquel en el agua antes de que sea distribuida en las diferentes localidades.

4.5. Literatura citada

- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., Delia, M., & Paris, M. (2003). Protección de la calidad del agua subterránea, guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Banco Mundial. Washington, D.C. 124p.
- Gray, N. F. 1999. Water Technology: An Introduction for Environmental Students. Elsevier Science & Technology Books, New York. pp: 133-189.
- Higuera I.A., Castillo E.I., Eslava C.C., Cifuentes E., Cortés M.J., Murillo R.M. y Yalaupari M.J.P. (2000). Contaminación del Agua y efectos en la salud. <http://cofepris.salud.gob.mx/bv/libros/Cap02.pdf> 22/11/2007
- López R. X. (2018). Análisis de costo de oportunidad del agua potable en la localidad Emiliano Zapata – ISSSTE, Texcoco. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, Edo. México.
- Martínez L. D (2014). Análisis físico – químico y bacteriológico de los pozos de agua potable de Texcoco, Estado de México. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, Edo. México.
- Nissen, J., Garay, M., & Aguilera, A. (2000). Calidad de aguas subterráneas de la Décima Región de Chile. Agro sur, 28(1), 25-39.
- Price M. (2007). Agua subterránea. Limusa, Ciudad de México, 330 pp.
- Ramírez, E., Robles, E., Sainz, M., Ayala, R., & Campoy, E. (2009). Calidad microbiológica del acuífero de Zacatepec, Morelos, México. Revista internacional de contaminación ambiental, 25(4), 247-255.

5. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DEL MOVIMIENTO DEL FLUJO DEL AGUA EN LA ZONA SATURADA HACIA LOS POZOS DE LAS COMUNIDADES DE TEXCOCO ALEDAÑAS A LAS MINAS TLAMINCA Y TEQUEXQUINAHUAC

RESUMEN

Las grandes reservas de agua subterránea se denominan acuíferos, siendo estos una formación geológica que almacena agua y sirve como depósito. Actualmente la problemática que presentan los acuíferos ha ido en aumento, puesto que depende principalmente de las características hidrogeológicas de las zonas, del uso que se les da a los acuíferos y de las aportaciones que estos reciben. En Texcoco una de las problemáticas que se ha presentado recientemente es el relleno de los socavones de la zona nororiental de Texcoco y la incertidumbre de lo que pueda generar esto respecto a la calidad del agua y el tiempo en que se presentará. Con la información piezométrica y la Ley de Darcy, se estimó la recarga horizontal por flujo subterráneo para la zona nororiental del acuífero de Texcoco, la velocidad y el tiempo de llegada del flujo de agua a cada pozo muestreado. El objetivo fue conocer el tiempo aproximado en que el flujo de agua se moverá dentro del medio saturado y con ello el tiempo en que se verá afectado el consumo de agua en las comunidades alejadas a los socavones. Los resultados obtenidos cuentan con un rango de tiempo partiendo de la porosidad eficaz, estos son los tiempos estimados del movimiento del agua desde que llega a la zona saturada, a estos tiempos es necesario sumarle el tiempo aproximado del movimiento del agua desde la superficie y su paso por la zona no saturada.

Palabras clave: Agua subterránea, movimiento del agua, zona saturada, contaminación del acuífero.

5.1. Introducción

Las aguas subterráneas forman los acuíferos. La recarga de un acuífero se lleva de una forma relativamente lenta y si esa agua se extrae a un ritmo mayor, el volumen de agua almacenada tiende a disminuir, así mismo, el aumento de áreas urbanas derivada del crecimiento de la población contribuye a la disminución de la recarga de los acuíferos (Cruz, 2007)

Un acuífero no solamente puede ser afectado por la sobreexplotación, sino también por la contaminación que tiene como resultado el uso de fertilizantes agrícolas, las fugas de aguas negras y los desechos industriales, entre otros. Cuando un acuífero se contamina su saneamiento puede tomar largo tiempo y resultar muy costoso, incluso puede llegar a ser imposible restablecer su condición anterior (Cruz, 2007)

En un medio poroso se cree que los poros se encuentran saturados por el flujo de agua, sin embargo, cuentan con vacíos interconectados que facilitan contener y dejar circular el agua almacenada, como la gravedad y otros factores, o exteriores, ejemplo de ellos son los bombeos (Gómez, 2016).

La ley de Darcy muestra que el caudal que atraviesa el área de la sección transversal de un medio poroso es proporcional a la sección que atraviesa, a la pérdida de energía y a un coeficiente que depende del material y que es inversamente proporcional a la longitud del medio poroso; esto muestra el movimiento unidimensional del agua en un medio poroso (Kresic, 2007).

La zona vadosa y su hidrología conforman un papel de gran importancia dentro del ciclo hidrológico ya que permite la regulación de la infiltración, evapotranspiración, escurrimiento, tasa de aporte de los caudales base a las corrientes de agua y la recarga de acuíferos; ésta es conocida como la zona de transición entre las fases superficiales y subterráneas (Varela, 1993); sin embargo, el principal problema que presenta esta zona es falta de estudios por alguna disciplina científica en relación a su uso, gestión y conservación, ésta zona es característicamente heterogénea lo que hace difícil las mediciones en campo (Varela, 1993). El objetivo de esta investigación fue determinar el tiempo y distancia que tomará que el flujo de agua en moverse y llegar a los pozos de las comunidades aledañas a las minas de arena ubicadas en Tlaminca y Tequexquahuac, considerando esto desde que el agua llega a la zona saturada.

5.2. Metodología

5.2.1. Obtención de información

Se realizó una revisión bibliográfica para conocer las elevaciones de nivel estático, de diferentes años, tomando la elevación del nivel estático del 2016 (Hernández y Téllez, 2016), para realizar la configuración correspondiente, usando el método de interpolación Kriging en Arc Gis se obtuvo el nivel estático de cada pozo con el que se trabajó.

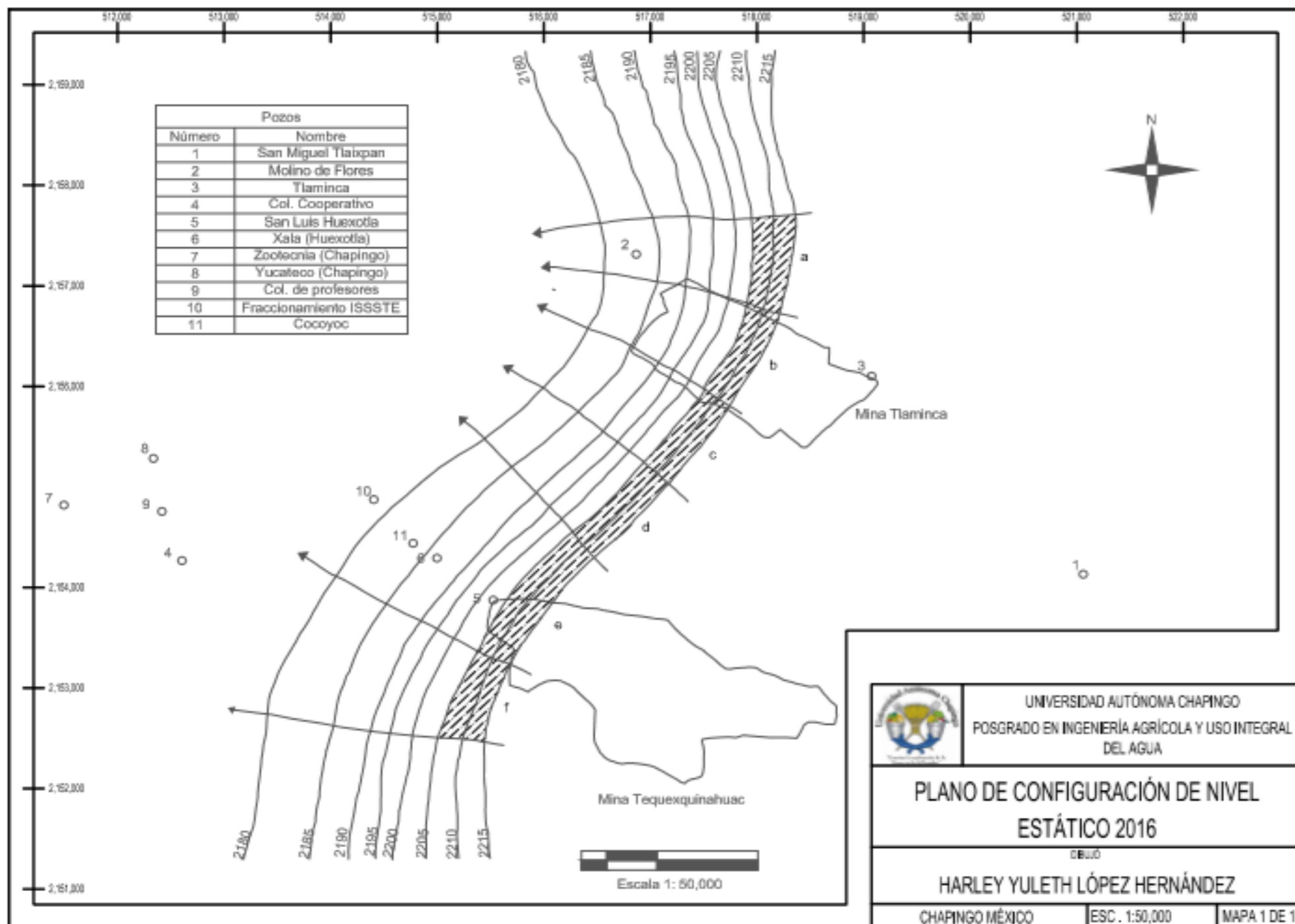
El valor de transmisividad se obtuvo realizando una corrección por espesor de acuífero de un 10% tomando en cuenta los datos obtenidos por Morales y Pérez (1990) siendo el valor de transmisividad de $0.009 \text{ m}^2/\text{s}$

5.2.2. Configuración de la elevación del nivel estático 2016

Esta configuración se realizó a mano alzada, se tomaron las equipotenciales 2205 msnm y 2215 msnm, posteriormente se trazaron las líneas de flujo formando las celdas de flujo para la zona nororiental del acuífero de Texcoco, las cuales alimentan los pozos que se estudiaron, ubicados en la zona cercana a las minas de Tlaminca y Tequexquihuac.

Se estimó la recarga por flujo subterráneo en la zona, mediante el cálculo del caudal a partir de los desniveles piezométricos, con la construcción de celdas de flujo hidráulico y la transmisividad de la capa acuífera, con ello se realizó la cuantificación de caudales de flujo subterráneo, esta cuantificación se basa en el concepto de red de flujo y en la Ley de Darcy, posteriormente se obtuvo la velocidad y el tiempo de llegada del flujo de agua a cada pozo con el que se trabajó.

Se generaron celdas de flujo. Se consideró la diferencia de carga entre equipotenciales (h_1-h_2) de 10m para la zona de recarga, con seis celdas enumeradas de a a f.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL
DEL AGUA

PLANO DE CONFIGURACIÓN DE NIVEL ESTÁTICO 2016

DEJÓ

HARLEY YULETH LÓPEZ HERNÁNDEZ

CHAPINGO MÉXICO

ESC. 1:50,000

MAPA 1 DE 1

5.3. Resultados y discusión

Para el cálculo del caudal que fluye en el acuífero, se tomaron en cuenta las dimensiones medias de las celdas trazadas (B y L), la transmisividad, el gradiente hidráulico.

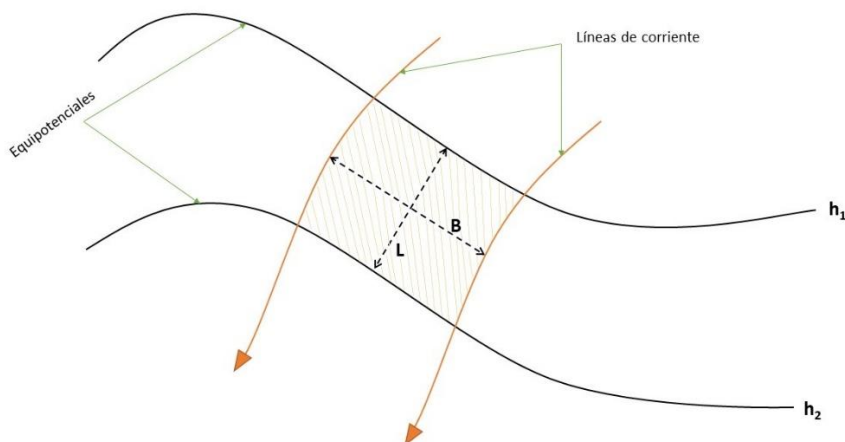


Figura 5. Celda para cálculo de flujo subterráneo.

En la siguiente tabla se mencionan las medidas de cada celda desde **a** a **f**:

Tabla 9. Medidas de cada celda y gradiente hidráulico.

Celda	B (m)	(L) m	h_1-h_2 (m)	$i = (h_1-h_2)/L$
a	1000	350	10	0.029
b	1050	300	10	0.033
c	1000	300	10	0.033
d	1050	350	10	0.029
e	1450	400	10	0.025
f	950	400	10	0.025

El caudal de cada celda se calculó con:

$$Q=B*T*i$$

Tabla 10. Cálculo de caudal para cada celda.

Celda	B (m)	T (m²/s)	i	Q (m³/s)
a	1000	0.009	0.029	0.257
b	1050	0.009	0.033	0.315
c	1000	0.009	0.033	0.300
d	1050	0.009	0.029	0.270
e	1450	0.009	0.025	0.326
f	950	0.009	0.025	0.214
				1.682

La velocidad real se calculó con la siguiente fórmula:

$$V_r = (K \cdot i) / S_y$$

Con el valor mínimo de la porosidad eficaz se obtuvo:

Tabla 11. Cálculo de velocidad real para cada celda con el valor mínimo de S_y .

Celda	Va (m/s)	Sy	Vr (m/s)
a	0.00000129	0.2	0.00000643
b	0.00000150	0.2	0.00000750
c	0.00000150	0.2	0.00000750
d	0.00000129	0.2	0.00000643
e	0.00000113	0.2	0.00000563
f	0.00000113	0.2	0.00000563

Y con el valor máximo de la porosidad eficaz se obtuvo:

Tabla 12. Cálculo de velocidad real para cada celda con el valor máximo de S_y .

Celda	Va (m/s)	Sy	Vr (m/s)
a	0.00000129	0.35	0.00000367
b	0.00000150	0.35	0.00000429
c	0.00000150	0.35	0.00000429
d	0.00000129	0.35	0.00000367
e	0.00000113	0.35	0.00000321
f	0.00000113	0.35	0.00000321

Se tomaron los valores de S_y (Porosidad eficaz) máximo y mínimo porque de esta manera permite tener un rango para la evaluación de la velocidad en que se moverá el flujo del agua, por lo tanto, la velocidad real varía; el sitio de estudio forma parte de una zona de transición con formación de rocas

andesíticas y arenas, con alto contenido de sodio lo que genera que sean suelos menos permeables, por lo tanto, la velocidad del flujo del agua es baja, Monroy y Pérez (2003) mencionan que en este sitio se presentan valores de infiltración baja con valores de 0.5 m³/día y menores.

En este caso, siendo una zona de baja permeabilidad y viendo los valores que se obtuvieron en velocidad del flujo de agua, ésta se considera como velocidad lenta.

Tabla 13. Tiempo de desplazamiento de flujo del agua desde las celdas a cada pozo.

Pozo	Distancia de la celda (m) a cada pozo	Tiempo de desplazamiento (años)	de	
			Sy 20%	Sy 35%
Molino de Flores	1350		6.66	11.65
Cooperativo	3450		19.45	34.04
San Luis Huexotla	275		1.55	2.71
Xala	1000		5.64	9.87
Zootecnia	4650		26.21	45.87
Yucateco (Chapingo)	4150		23.39	40.94
Colonia (Chapingo)	3800		21.42	37.49
ISSSTE (Emiliano Zapata)	1875		10.57	18.50
Cocoyoc.	1275		7.19	12.58

Los valores que se obtuvieron respecto al tiempo de desplazamiento muestran un rango amplio de los años en que puede llegar el flujo de agua desde la celda que se consideró para este estudio, este rango genera una visión amplia de lo que puede ocurrir para los pozos estudiados, puesto que de cada pozo el tiempo máximo en el que puede moverse el flujo de agua es el doble de tiempo si toma la porosidad máxima, en que puede ocurrir si la porosidad es la mínima en la zona de estudio.

En el caso del pozo de San Luis Huexotla que es el más cercano a la mina de Tequexquinahuac, el tiempo en que se presentará la contaminación será de entre 1.55 años y 2.71 años aproximadamente teniendo en cuenta la porosidad mínima y la porosidad máxima; para el pozo de Zootecnia de la Universidad

Autónoma Chapingo siendo el pozo más lejano a la mina de Tequexquihuac el tiempo en que se presentará la contaminación será de entre 26.21 y 45.87 años aproximadamente, el tiempo que aquí se menciona es a partir de que el agua con contaminantes llegue a la zona saturada.

Es necesario tener en cuenta el tiempo en que el flujo de agua recorre la zona vadosa, desde la superficie hasta la zona saturada, puesto que en la zona vadosa el movimiento del agua es lento, uno de los principales problemas para el estudio de la zona vadosa que dificulta las mediciones en campo es que esta zona es especialmente heterogénea, en suelos no saturados el movimiento del agua sucede en ambientes más complicados que en flujo saturado de agua. Cuando los macroporos se llenan de aire, quedan disponibles solamente los poros finos para que el agua se mueva; en estas circunstancias la fuerza que rige el flujo de agua tienen diferencias en potencial de agua, considerando la diferencia de potencial mátrico como la principal fuerza e movimiento.

5.4. Conclusiones

El tiempo del movimiento del agua dentro de la zona saturada muestra que, en un futuro cercano, habrá un impacto en la calidad del agua potable en las comunidades en la parte nororiental del acuífero de Texcoco por los desechos del Ex - Lago de Texcoco depositados en esta zona.

Para determinar el tiempo real en que el flujo de agua se moverá desde la superficie hasta la zona saturada y a cada pozo de las comunidades del municipio de Texcoco, es necesario considerar y estudiar de una forma integral la zona no saturada.

5.5. Literatura citada

- Cruz Falcón, A. (2007). *Caracterización y diagnóstico del Acuífero de La Paz, BCS, mediante estudios geofísicos y geohidrológicos* (Doctoral dissertation, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas).
- Gómez G. J. A., (2016). Estudio de efecto de la heterogeneidad del medio en el transporte de contaminantes en aguas subterráneas implementando métodos lagrangianos. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.
- Hernández J. Z. y Téllez P. O (2016), Actualización de la red de monitoreo piezométrico y análisis de la calidad de agua del acuífero Texcoco (1507), Tesis, Estado de México.
- Kresic, N. (2007). Hydrogeology and Groundwater modeling.
- Monroy A. C. y Pérez H. A. (2003), Metodología práctica para evaluar las zonas de recarga natural a los acuíferos: caso Valle de Texcoco.
- Morales C. E y Pérez H. H. (1990). Estudio geohidrológico de cuantificación y modelo matemático del acuífero de Chapingo y zonas aledañas. Chapingo, Estado de México.
- VARELA, M. El medio físico: Relaciones agua-aire-suelo. En: CANDELA, L. y VARELA, M. La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas: Teoría, medición y modelos. Cimne, Barcelona, 1993. Pp. 11 – 26.

6. CONCLUSIONES GENERALES

- La calidad del agua respecto a los microorganismos para los pozos muestreados indica que no hay presencia de coliformes fecales, sin embargo, el pozo del Molino de flores muestra presencia de coliformes totales.
- La calidad del agua actualmente es buena para la mayoría de los pozos aledaños a los socavones, sin embargo, la presencia de níquel en los pozos de La Colonia de profesores (0.029 mg/l), ISSSTE (0.022 mg/l), Cocoyoc (0.021 mg/l) y Yucateco (0.022 mg/l), indican que es necesario mantener a las comunidades alertas respecto a este metal.
- Para conocer la procedencia del níquel se requiere un mayor estudio, y poder decir con exactitud si es un metal que se encuentra dentro del sistema por el tipo de material que compone el acuífero, o si proviene de la contaminación superficial y/ o encontrar la procedencia del níquel.
- El tiempo del movimiento del agua es una aproximación de lo que va a suceder de a partir del momento en que los contaminantes lleguen a la zona saturada del acuífero nororiental de Texcoco, en el caso del pozo de San Luis Huexotla el pozo más cercano a la mina de Tequexquinahuac sería de 1.55 años como tiempo mínimo y el pozo de Zootecnia ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo sería en un tiempo máximo de 45.87 años, siendo este pozo el más alejado de la mina de Tequexquinahuac.
- El estudio de la zona no saturada es de suma importancia para poder establecer el tiempo real en que los efectos negativos del relleno de socavones llegarán a las comunidades del municipio de Texcoco.

7. RECOMENDACIONES

- Es necesario que exista un monitoreo constante de la calidad de los pozos aledaños a los socavones, para conocer cómo va cambiando a lo largo del tiempo.
- Se requiere realizar mayores estudios en los pozos para los diferentes parámetros hidráulicos, lo que va a permitir un mejor conocimiento de la zona no saturada en este sitio.
- Es de gran importancia realizar un estudio para conocer la procedencia del níquel y hacer un análisis constante de este metal para hacer comparaciones con el presente estudio, conocer cuál es la tendencia que sigue su concentración y con ello poder tomar las medidas necesarias para evitar futuros problemas que este metal pueda generar en la salud.