



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**PROPUESTA DEL TREN DE TRATAMIENTO PARA LA  
POTABILIZACIÓN DEL AGUA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DEL  
MEZQUITAL COMO FUENTE ALTERNATIVA DE ABASTECIMIENTO  
PARA EL VALLE DE MÉXICO**

**T E S I N A**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA**

PRESENTA:

**ARTURO CLAUDIO PIEDRAS**

DIRECTOR DE TESINA: **Dr. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ**

MÉXICO, D.F.

JULIO 2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## Contenido

<b>Introducción</b> .....	<b>6</b>
<b>Objetivo</b> .....	<b>9</b>
<b>Objetivos particulares</b> .....	<b>9</b>
<b>1. Descripción general de las principales fuentes de abastecimiento de la Zona Metropolitana del Valle de México.</b> .....	<b>10</b>
1.1. Fuentes actuales de abastecimiento de la ZMVM .....	11
1.1.1. Cuenca del Valle de México.....	13
1.1.2. Sistema Cutzamala .....	18
1.1.3. Sistema Lerma.....	20
1.2. Principales fuentes alternativas.....	21
1.2.1. Proyecto Temascaltepec (Cutzamala 4ta Etapa) .....	22
1.2.2. Sistema Tecolutla -Necaxa.....	23
1.2.3. Sistema Mezquital .....	27
<b>2. Principales estudios y resultados de la calidad del Agua en el Valle del Mezquital</b> <b>30</b>	
2.1. Composición y caracterización del Agua en el Valle del Mezquital.....	31
2.2. Principales contaminantes a remover.....	39
<b>3. Tecnologías actuales de potabilización</b> .....	<b>43</b>
3.1. Sistemas de Filtración .....	44
3.2. Procesos de Membrana.....	46
3.3. Sistemas de adsorción y de Intercambio Iónico .....	48
3.4. Desinfección química y oxidantes.....	51
<b>4. Propuesta del tren de tratamiento para la Potabilización del agua proveniente del Acuífero del Valle del Mezquital</b> .....	<b>54</b>
4.1. Límites máximos permisibles de calidad de agua para consumo Humano .....	54
4.2. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco .....	54
4.3. Propuesta del tren de tratamiento .....	58
<b>5. Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	<b>63</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>65</b>
<b>ANEXO A</b> .....	<b>68</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1. Volúmenes de abastecimiento de agua potable por fuente de suministro, indicando volumen, gasto y porcentaje. ....	12
Tabla 2. Recarga y sobreexplotación de los principales acuíferos de la ZMVM. ....	13
Tabla 3. Resultados de los análisis físico – químicos de las zonas muestreadas. ....	34
Tabla 4. Contaminantes que concuerdan en los últimos tres estudios realizados en el Valle del Mezquital. Tomado de Carmona y Muñiz, 2014. ....	37
Tabla 5. Diferencias de los contaminantes que se han encontrado en los últimos tres estudios. Tomado de Carmona y Muñiz, 2014. ....	37
Tabla 6. Contaminantes ordenados de mayor a menor riesgo. Tomado de Carmona y Muñiz, 2014. ....	39
Tabla 7. Resumen de los principales parámetros que rebasan la Norma. ....	40
Tabla 8. Principales contaminantes emergentes. ....	41
Tabla 9. Calidad esperada del efluente de la PTAR Atotonilco. Tomado de MIA SEMARNAT. ....	58
Tabla 10. Resumen de los principales parámetros que rebasan la Norma. ....	59

## Índice de Figuras

Figura 1. Zona Metropolitana del Valle de México .....	10
Figura 2. Fuentes de abastecimiento de agua potable ZMVM.....	12
Figura 3. Localización del Acuífero Cuautitlán - Pachuca. Tomado de Galindo, et al., 2010.	14
Figura 4. 680 pozos sobre el Acuífero de la Ciudad de México. Tomado de Hernández, 2013.....	16
Figura 5. Acuífero Texcoco .....	17
Figura 6. Plano del Sistema Cutzamala.....	19
Figura 7. Sistema Lerma .....	20
Figura 8. Sistema de la nueva fuente de abastecimiento: Temascaltepec. ....	23
Figura 9. Primera fase del Sistema Tecolutla - Necaxa.....	25
Figura 10. Segunda fase del Sistema Tecolutla - Necaxa .....	26
Figura 11. Ubicación y acuíferos del Valle del Mezquital. ....	27
Figura 12. Esquema del sistema del Valle del Mezquital. ....	30
Figura 13. Zonas muestreadas para los análisis físico-químicos. Tomado de Lesser, et al., en el 2011. ....	32
Figura 14. Sitios muestreados para contaminantes emergentes. Tomado de Lesser y asociados en el 2013. ....	35
Figura 15. Compuestos con mayor frecuencia encontrados en 19 pozos. Tomado de Carmona y Muñiz, 2014. ....	36
Figura 16. Ubicación de la PTAR Atotonilco.....	55
Figura 17. Tren de tratamiento de la PTAR Atotonilco. Tomado de MIA SEMARNAT. ....	56

Figura 18. Tren de tratamiento propuesto para la potabilización del agua del Acuífero del Valle del Mezquital. ....59

## Introducción

El problema del suministro de agua potable ha estado presente en todas las sociedades humanas, en primer lugar se han explotado las fuentes superficiales como ríos, arroyos, estanques y lagunas para posteriormente aprovechar las fuentes subterráneas iniciando con manantiales y norias, aprovechando el artesianismo para finalmente recurrir a los acuíferos más profundos. Es en este camino donde aparece el correcto uso del recurso agua para cumplir con los requerimientos actuales y proteger la seguridad hídrica de las generaciones futuras, en pocas palabras para buscar la “sustentabilidad” como define la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (Carmona, et al., 2014).

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), es un claro ejemplo del reto que significará dotar de agua a las modernas megalópolis. Las tendencias de crecimiento indican que para el año 2020 la población en la ZMCM será de aproximadamente 25 millones de habitantes, por tanto, es de esperarse también un aumento en la demanda de agua (Centro del tercer mundo para el manejo del agua A.C., 2002).

La disponibilidad de agua para el abastecimiento a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), se ha visto menguada por diversos factores como la sobrepoblación lo que ocasiona una mayor demanda de servicios, y que se exceda la capacidad de la propia cuenca induciendo la necesidad de importar agua desde cuencas vecinas (Carmona y Muñiz, 2014), sin embargo, continuar importando agua de otras cuencas y retornarla sin tratamiento alguno contribuye aún más al estrés hídrico, por lo que es necesario concebir la gestión de los recursos hídricos como un conjunto integral de procesos en los cuales la generación, el tratamiento y reutilización del agua residual toman el papel central para aspirar a los preceptos de un desarrollo y uso sustentable del agua. De esta manera, el tratamiento de agua residual y su posterior disposición para uso directo o recarga de acuíferos tiene como finalidad reutilizarla para alcanzar la sustentabilidad hídrica.

Esta es una alternativa real para el futuro de México, sobre todo para las zonas más sobreexplotadas como el Valle de México, donde se ha llevado al extremo la explotación de sus acuíferos, alcanzando un 40% más de la recarga natural, (CONAGUA, 2013). Dicha alternativa garantizaría el suministro de la población

futura del Valle de México que se estima tendrá 30.17 millones de habitantes para el año 2050, (CONAPO, 2014).

En la búsqueda por reducir esta sobreexplotación, se ha propuesto que el Valle del Mezquital sea una fuente alternativa de abastecimiento de recursos hídricos para la ZMVM. Esto debido a que dicha zona ha estado recibiendo por más de 100 años el agua residual del Valle de México, la cual se han infiltrado sin tratamiento alguno una vez que ha sido reusada para el riego de aproximadamente 80,000 ha.

Con base en lo anterior, se han realizado diversos estudios de la calidad, tratamiento y reúso del agua superficial y subterránea en la zona coincidiendo en que es factible lograr la calidad potable de esta agua mediante el uso porcesos basados en membranas. Los trenes de tratamiento que han sido sugeridos incluyen procesos de filtración a través de diferentes medios (arena, antracita, nanofiltración y osmosis inversa), remineralización, desinfección, entre otros, (Jiménez et al., 2008; FG y Asociados, 2009; IMTA, 2010; Lesser y Asociados, 2013).

Actualmente las tecnologías de potabilización son tan avanzadas que es posible potabilizar casi cualquier tipo de fuente de abastecimiento debido a que existen procesos físicos, químicos, biológicos y combinaciones de ellos para la potabilización. Todos los procesos tienen limitaciones y tanto sus ventajas como sus limitaciones son los que definen sus campos de aplicación. En este documento se presentan aquellos tratamientos que son aptos para potabilizar una fuente de abastecimiento no convencional como lo es el Acuífero del Valle de Mezquital, debido a que varios autores coinciden en que actualmente es posible alcanzar la calidad potable de esa fuente.

Para ser apta para consumo humano el agua requiere de una serie de operaciones y procesos unitarios que se establecen acordes a su calidad inicial. La fuente de abastecimiento y las circunstancias en el sitio en particular son las que definirán la calidad del agua de dicha fuente, las dificultades que tendrán que enfrentarse para hacerla potable y las complejidades de los procesos que se deberán aplicar para convertirla en inocua (una de las características principales que debe cumplir el agua para ser considerada apta para consumo humano). Puede decirse que, en general, el agua subterránea es de mejor calidad y requiere menos tratamiento para su uso puesto que no contiene sedimentos suspendidos, mientras que el agua superficial, por esa razón, requiere de operaciones y procesos unitarios diferentes y



más complejos para la remoción de esos sólidos suspendidos y sustancias asociadas (Leal, 2000), sin embargo, en el presente trabajo se propone potabilizar el agua subterránea de un acuífero que ha sido recargado por más de 100 años con agua residual sin tratamiento alguno, por lo que las complejidades de los tratamientos obedecerán a la calidad inicial del agua presente en el uno de los acuíferos del Valle del Mezquital.

Otro de los factores importantes a tomar en cuenta son las normatividades tanto nacionales como internacionales, que establecen los límites máximos permisibles de calidad para definir el efluente de una planta potabilizadora como apto para consumo humano. En la actualidad en México se dispone de la Norma Mexicana NOM-127-SSA-1-1994 y es conveniente considerar los estándares de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011); para aquellos contaminantes no incluidos en la norma nacional es posible referirse a las concentraciones máximas de United States Environmental Protection Agency (EPA, 2012).

Como parte de un plan integral que considera al Acuífero del Valle del Mezquital como fuente de abastecimiento de agua, el Gobierno de la República en el Plan Nacional de Desarrollo (2013- 2018) incorporó en su Plan Nacional Hídrico el proyecto de Saneamiento para el Valle de México de la CONAGUA, el cual tiene como uno de sus principales propósitos el mejoramiento de las condiciones de calidad del agua residual generada en la ZMVM, en la propia Cuenca de México y en distritos agrícolas aledaños, estableciendo condiciones acordes con la normatividad vigente y buscando la protección de la población que habita y trabaja en la zona de influencia del programa.

Para este último objetivo la condición de referencia es obtener la calidad adecuada para que el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Atotonilco sea utilizado de forma segura en el riego de las zonas agrícolas alimentadas a través del Canal El Salto-Tlamaco, con las características estipuladas en las Condiciones Particulares de Descarga, que son comparables con las establecidas por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

## **Objetivo**

Proponer un tren de tratamiento para potabilizar el agua infiltrada en el Acuífero del Valle del Mezquital con el fin de utilizarla como fuente alternativa de abastecimiento para el Valle de México.

## **Objetivos particulares**

- Analizar y discutir las principales fuentes actuales y alternativas de abastecimiento para el Valle de México.
- Plantear el reúso de las aguas subterráneas del Acuífero del Valle del Mezquital como fuente alternativa de abastecimiento para la Zona Metropolitana del Valle de México.
- Realizar una revisión de los principales estudios de la calidad del agua en el Valle del Mezquital para a partir de ellos proponer un tren de tratamiento para su potabilización.
- Realizar una revisión de las diferentes tecnologías de potabilización con el fin de seleccionar el orden y la combinación de los sistemas más adecuados para alcanzar la calidad potable del agua del Acuífero del Mezquital.
- Realizar la propuesta del tren de tratamiento para la potabilización del agua proveniente del Acuífero del Valle del Mezquital a partir del análisis de los estudios reportados de la calidad del agua realizados en diferentes zonas del Valle del Mezquital para que cumpla con la NOM-127-SSA-1-1994.

## 1. Descripción general de las principales fuentes de abastecimiento de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Actualmente la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) comprende el Distrito Federal (16 Delegaciones), 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca del Estado de Hidalgo (CONAPO, 2010) y se estima que en ella habitan alrededor de 20.5 millones de personas de acuerdo con el Censo de Población realizado por el INEGI en 2010, lo que representa la sexta parte de la población del País concentrada en esta zona (Figura 1).

Al ser de 7,854 km<sup>2</sup> la superficie aproximada de la ZMVM (SEDESOL, 2007) la ONU en 2012, la reportó como la tercer ciudad más poblada del mundo con una densidad de población de 2561.3 Hab/km<sup>2</sup>, por lo que presenta graves problemas de suministro de agua potable.

De acuerdo con las tendencias de crecimiento de la mancha urbana se considera probable la inclusión futura de otros 28 municipios del Estado de Hidalgo a la ZMVM y consecuentemente un incremento de los problemas para lograr abastecer de servicios a la población, en particular el agua potable en atención a la situación de las fuentes superficiales y la sobreexplotación de los acuíferos de la zona (Carmona, et al., 2014).



Figura 1. Zona Metropolitana del Valle de México

En respuesta a esta demanda de abastecimiento de agua, el gobierno a través de los años, ha conformado diferentes organismos dedicados a administrar y preservar las aguas nacionales para finalmente conformar la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a la cual le antecedieron organismos como: la Dirección de Aguas, Tierras y Colonización creada en 1917; la Comisión Nacional de Irrigación, en 1926; la Secretaría de Recursos Hidráulicos en 1946 y la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en 1976, los cuales a través de diferentes proyectos se han encargado del suministro y abastecimiento de agua a la ZMVM.

### **1.1. Fuentes actuales de abastecimiento de la ZMVM**

La demanda en la ZMVM es de aproximadamente 62 m<sup>3</sup>/s, de los cuales 35 m<sup>3</sup>/s se destinan al DF y 27 m<sup>3</sup>/s a los municipios conurbados del Estado de México. Las tres principales fuentes de abastecimiento son el acuífero del Valle de México (66%), el acuífero del Valle de Lerma (9%), y el sistema Cutzamala (25%) (Centro del tercer mundo para el manejo del agua A.C., 2002).

El abastecimiento actual de agua potable a la ZMVM se lleva a cabo empleando fuentes internas y externas así como con agua de origen superficial y subterránea. El acuífero de la ZMVM se divide en dos rubros, el primero corresponde a la capacidad del mismo en donde no aparece un aprovechamiento mayor a la recarga de acuerdo la publicación en el Diario Oficial de la Federación (20 de Dic. 2013), en el segundo caso se toma en cuenta la sobreexplotación también tomada de la publicación mencionada.

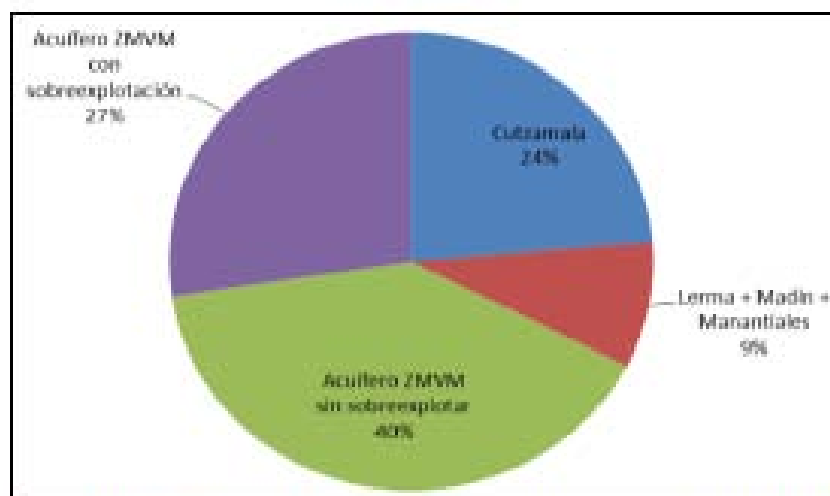
De acuerdo con el balance hidráulico, los usuarios demandan un volumen anual total de 2583 hm<sup>3</sup> (81.9 m<sup>3</sup>/s) distribuidos de la forma siguiente: doméstico 2041 hm<sup>3</sup> (64.7 m<sup>3</sup>/s); industrial 145 hm<sup>3</sup> (4.6 m<sup>3</sup>/s); y agrícola 397 hm<sup>3</sup> (12.6 m<sup>3</sup>/s). Adicionalmente, para satisfacer los volúmenes demandados se recurre a tres fuentes disponibles: los acuíferos y agua superficial de la Cuenca del Valle México y a la importación de agua de la Cuenca del Río Lerma (agua subterránea) y de la Cuenca del Río Cutzamala (agua superficial) (Tabla 1), (CNA, 2007a).

**Tabla 1. Volúmenes de abastecimiento de agua potable por fuente de suministro, indicando volumen, gasto y porcentaje.**

Fuente	Volumen hm <sup>3</sup>	Gasto m <sup>3</sup> /s	Porcentaje
Cuenca del Valle de México			
Extracciones de los acuíferos	1876	59.5	72
Ríos y manantiales	92	2.9	4
Fuentes externas			
Sistema Lerma	151	4.8	6
Sistema Cutzamala	464	14.7	18
Total	2583	81.9	100

Fuente: CONAGUA, 2007<sup>a</sup>.

La figura 2 muestra en porcentajes las aportaciones de cada fuente de abastecimiento, se trasvasa el agua superficial del Sistema Cutzamala, también se exporta agua subterránea del Sistema Lerma junto con pequeños aprovechamientos de Madín y Manantiales y se aprovecha el agua subterránea del acuífero de la ZMVM el cual está sobreexplotado (Breña y Breña, 2009).



**Figura 2. Fuentes de abastecimiento de agua potable ZMVM.**

Al sumar las fuentes actuales, en total se suministran 63 m<sup>3</sup>/s, que resultan insuficientes en atención a diferentes factores, destacando el porcentaje tan grande de pérdidas en el sistema de distribución sobre todo el de la Ciudad de México en donde existen zonas hasta con un 40% de fugas.

### 1.1.1. Cuenca del Valle de México

La Cuenca del valle de México es la principal fuente de abastecimiento de la ZMVM con una superficie aproximada de 9 600 km<sup>2</sup> y un aporte de 59.5 m<sup>3</sup>/s lo cual representa el 72 % del abastecimiento total a la ciudad (CONAGUA, 2007a). Dicha Cuenca, está conformada principalmente por 4 Acuíferos (Tabla 2).

- Acuífero Cuautitlán Pachuca
- Acuífero Ciudad de México
- Acuífero Texcoco
- Acuífero Chalco Amecameca

Tabla 2. Recarga y sobreexplotación de los principales acuíferos de la ZMVM.

Acuífero	Recarga Mm <sup>3</sup> /año	Volumen concesionado Mm <sup>3</sup> /año	Volumen extraído Mm <sup>3</sup> /año	Sobreexplotación Mm <sup>3</sup> /año
<b>Distrito Federal</b>				
Zona metropolitana de la Ciudad de México	512.8	1,110.2	623.8	111.0
<b>Estado de México</b>				
Chalco-Amecameca	79.3	79.3	100.3	21.0
Texcoco	161.0	248.9	184.2	23.2
Cuautitlán-Pachuca	356.7	248.9	751.3	394.6
<b>Subtotal de la zona metropolitana de la Ciudad de México</b>	<b>1,109.8</b>	<b>1,862.4</b>	<b>1,659.6</b>	<b>549.8</b>

#### Acuífero Cuautitlán Pachuca

La ZMVM presenta grandes problemas de abasto de agua. El acuífero Cuautitlán-Pachuca es un ejemplo de sobreexplotación irracional, ya que soporta la demanda de una de las mayores ciudades del mundo. Provee de agua a los más de diez millones de habitantes, industrias y agricultores que se encuentran dentro de sus límites. Por tanto, es un caso único y muy representativo del efecto del “gigantismo” urbano sobre las aguas subterráneas (CONAGUA, 2007).

Este acuífero es uno de los más importantes de esta región; con una superficie aproximada de 4.349 km<sup>2</sup>, representa el 23,6% de la Cuenca del Valle de México y es la principal fuente de abastecimiento de la zona norte de la Ciudad de México. Las principales poblaciones demandantes de agua subterránea son dos importantes zonas metropolitanas: Pachuca de Soto, con una tasa de crecimiento poblacional medio anual del 2,8% -de las más elevadas del país- y la Ciudad de

México, con una tasa del 0,8% (Figura 3), (CONAPO, 2005). Esto ha traído graves problemas ambientales ya que la deforestación, la erosión de suelos y la pérdida de zonas de recarga por el crecimiento urbano impiden la retención e infiltración del agua, provocando su escasez. Para el año 2020 se prevé que se necesitarán 37 mil hectáreas adicionales para albergar a la población urbana de estas dos ciudades (Garza, 2006).

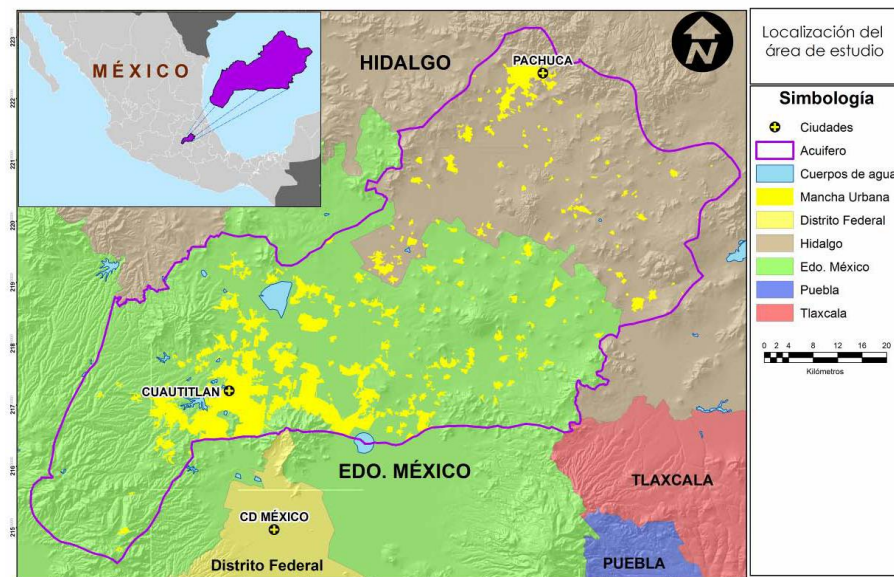


Figura 3. Localización del Acuífero Cuautitlán - Pachuca. Tomado de Galindo, et al., 2010.

La única fuente de recarga del acuífero es el agua de lluvia. Su superficie presenta una fisiografía característica de la parte central de México y su extenso valle es ideal para la generación de nuevos desarrollos habitacionales. Geológicamente el área está formada por depósitos aluviales y lacustres -principalmente gravas y arenas- con una alta permeabilidad, interrumpidas ocasionalmente por conos cineríticos y derrames de lavas de tipo vulcanitas básicas e intermedias. Éstas conforman las sierras que rodean al valle y algunos lomeríos dentro de la misma cuenca (Galindo, et al., 2010).

En los últimos diez años se realizaron diferentes informes técnicos acerca del acuífero Cuautitlán-Pachuca debido a la preocupación de los gobiernos por la disponibilidad del agua subterránea.

En el año 2002 la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) realizó un estudio para determinar la disponibilidad de agua en el acuífero. En este informe se estima una recarga media anual de 202,96 hm<sup>3</sup>/año, junto con una extracción de 243,39

hm<sup>3</sup>/año, lo que resulta en un déficit de 40 hm<sup>3</sup>/año y confirma la sobreexplotación de este acuífero (Galindo, et al., 2010).

Debido a esta situación, la CONAGUA y el Instituto de Ingeniería de la UNAM elaboraron el “Programa 2005-2015 de conservación y mantenimiento del sistema del plan de acción inmediata (PAI)” para regular el suministro de agua en la Ciudad de México. En este documento se estimó un aumento de los caudales de extracción del agua por bombeo en ese año (2005), el cual asciende a 483 hm<sup>3</sup>/año y se utilizó el mismo valor de recarga recogido en el estudio anterior, 202,96 hm<sup>3</sup>/año (CONAGUA, 2002). Por tanto, el déficit de agua calculado es de 280 hm<sup>3</sup>/año. Tan sólo en tres años el déficit aumentó en un 700%, debido, principalmente, al rápido crecimiento de las manchas urbanas que conllevó un aumento del número de perforaciones ilegales y de los caudales de extracción para cubrir la mayor demanda de agua de la población (Galindo, et al., 2010).

### **Acuífero Ciudad de México**

La explotación del acuífero del Valle de México comenzó a mediados del siglo XIX. Posteriormente, el crecimiento de la Ciudad de México ocasionó la sobreexplotación del acuífero con el consecuente descenso del nivel del agua subterránea y el hundimiento de la Ciudad. El periodo 1948 a 1953, fue el más crítico cuando los hundimientos alcanzaron 46 cm/año en algunas zonas. Estudios de esa época demostraron la relación entre la extracción de agua y el hundimiento, por lo que muchos pozos del centro fueron cerrados, sin embargo otros pozos fueron abiertos en la periferia de la Ciudad. Esta situación obligo a buscar opciones para continuar el abasto de agua, reducir las extracciones del acuífero y minimizar los hundimientos. A la fecha, el acuífero continúa siendo la principal fuente de abastecimiento con extracciones del orden de 45 m<sup>3</sup>/s. En contraste la recarga es de sólo 20 m<sup>3</sup>/s, lo que genera un déficit de 25 m<sup>3</sup>/s. Se estima que la ciudad de México se ha hundido 7.5 m en un periodo de 100 años. Como resultado existen severos daños a la infraestructura urbana, incluyendo la de los servicios de abastecimiento de agua y alcantarillado (Centro del tercer mundo para el manejo del agua A.C., 2002).

Aproximadamente 680 pozos con profundidades variables entre 100 a 994 m (Figura 4), generan un sobrebombeo continuo sobre el Acuífero de la Ciudad de México (ACM) en condiciones donde la recarga natural, claramente es excedida por la extracción (Hernández, 2013). Esta situación ha generado consecuencias indeseables: variaciones hidrogeoquímicas temporales, controladas por una



inversión en el gradiente hidráulico que genera flujos verticales descendentes del acuitardo al acuífero, tasas de abatimiento excesivas, de hasta 1.4 m/a, causando a su vez una disminución en la presión de poro en el ACM, provocando consolidación del acuitardo, subsidencia diferencial y deformación del terreno. (Lesser y Asociados, 2013).

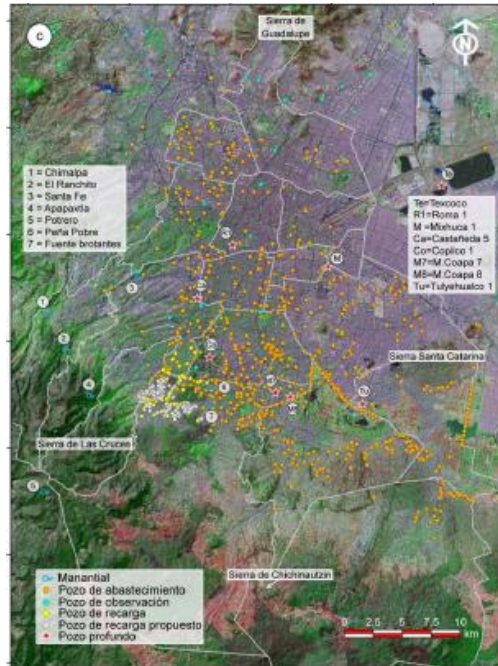


Figura 4. 680 pozos sobre el Acuífero de la Ciudad de México. Tomado de Hernández, 2013.

La perforación cada vez más profunda de los pozos ha propiciado mayores contenidos de sustancias que alteran la calidad del agua como hierro y manganeso, lo que ha significado el decremento de la calidad del agua y un aumento en los costos de potabilización. Adicionalmente, se estima que 40% del agua se pierde en las redes de distribución por fugas. La infraestructura urbana ahora presenta una mayor vulnerabilidad a los sismos. La sobreexplotación está drenando la humedad del suelo de las montañas aledañas, dañando el arbolado y reduciendo la viabilidad de los ecosistemas. Para 1997, se tenían registrados 400 pozos en el DF, con una extracción de 1,249 millones de m<sup>3</sup>. En el caso de los municipios conurbados del Estado de México la extracción era de 49.96 millones de m<sup>3</sup>, representando el 15% de las extracciones del DF. Sin embargo, es muy difícil establecer cuantificaciones precisas sobre los volúmenes extraídos, ya que se estima que existen de 5,000 a 10,000 pozos clandestinos (Centro del tercer mundo para el manejo del agua A.C., 2002).

### Acuífero Texcoco

Se ubica en la porción oriental de la cuenca del Valle de México, delimitado en forma general por las coordenadas geográficas  $19^{\circ} 19' 00''$  a  $20^{\circ} 41' 00''$  de latitud norte y  $99^{\circ} 01' 00''$  a  $98^{\circ} 39' 00''$  de longitud oeste, cubriendo parte del Estado de México (Figura 5). El acuífero Texcoco cubre de forma total 6 municipios y de forma parcial 5 municipios del Estado de México.

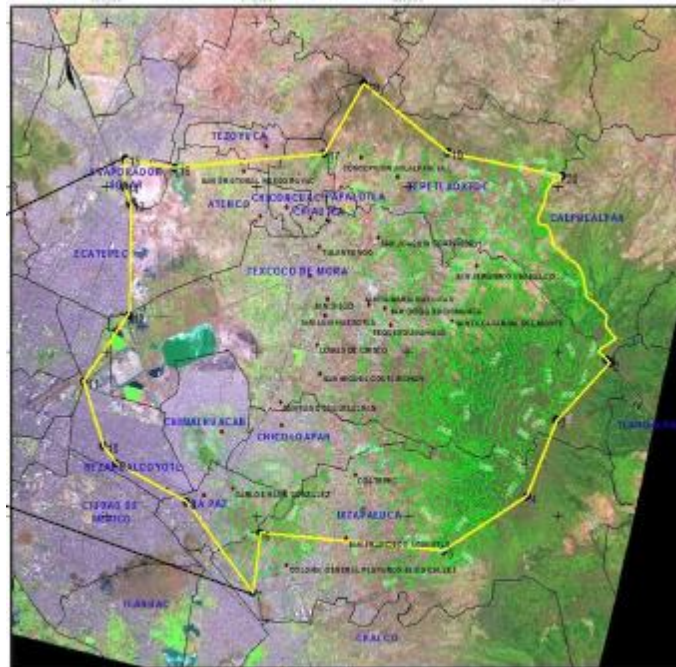


Figura 5. Acuífero Texcoco

### Acuífero Chalco Amecameca

La región Chalco Amecameca es una subcuenca adyacente a la cuenca de México, a la cual aporta parte de sus recursos de agua subterránea para satisfacer parcialmente sus necesidades de consumo. Esta región se localiza en el extremo SE de la Cuenca de México. Está delimitada por los paralelos  $19^{\circ} 04'$ ,  $19^{\circ} 24'$  de latitud norte y por los meridianos  $98^{\circ} 38'$  y  $99^{\circ} 01'$  de longitud oeste.

La subcuenca drena artificialmente hacia las planicies de Xochimilco y de Texcoco a través de los canales de Amecameca y de la Compañía respectivamente. Cubre una superficie de  $1195 \text{ km}^2$ , se sitúa entre los 2240 y 5452 m de altitud y contiene las siguientes unidades geomórficas: En el norte la planicie aluvial de Chalco, en la cual se distingue una antigua zona lacustre en su parte oeste, en el sur, el valle de Amecameca y la superficie restante de la subcuenca, que corresponde al relieve

volcánico de montaña formado por el Cerro del Pino y la Sierra Santa Catarina de Río Frío y Nevada (Huizar, 1992).

### **1.1.2. Sistema Cutzamala**

Para incrementar el abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México se inició, en 1976, la construcción del sistema Cutzamala; derivado del agotamiento de los recursos hídricos de la cuenca de Lerma y el constante hundimiento de la ciudad por la sobreexplotación del acuífero.

Uno de los principales retos a vencer y que ubicaron al Sistema Cutzamala como una de las mayores obras de ingeniería civil en el mundo, fue el bombeo del líquido desde una altura de 1,600 metros sobre el nivel del mar en su punto más bajo hasta los 2,702 metros sobre el nivel del mar en su punto más alto. Debido a que algunas presas se localizaban en cotas por debajo de la Ciudad de México, sin olvidar que en su trayecto recorre aproximadamente 127 kilómetros para conducir el agua hasta su punto final, extendiéndose por las entidades de Michoacán, Estado de México y Distrito Federal.

Para el desarrollo del sistema Cutzamala se consideraron tres etapas; en la primera se construyó el canal Martínez Meza, de 12 kilómetros de longitud, que conecta la presa Villa Victoria con una planta potabilizadora en Los Berros, Estado de México, con capacidad de 28 m<sup>3</sup>/s. En este lugar se situó un tanque de almacenamiento del cual salía un primer acueducto de 2.5 metros de diámetro y 77 kilómetros de longitud que constaba de tres túneles: uno que atraviesa la sierra de las Cruces, otro en Agua Escondida y el de Analco-San José. Esta etapa fue inaugurada en 1982 por el entonces presidente José López Portillo, y entregaba inicialmente 4 m<sup>3</sup>/s en Dos Ríos, municipio mexiquense de Huixquilucan. Los trabajos realizados durante la segunda y tercera etapa fueron los de mayor dificultad a lo largo del proyecto; fue necesaria la construcción de 6 plantas de bombeo que permitieran elevar el agua de aquellas presas que registraban niveles más bajos respecto a la planta potabilizadora de Los Berros, como el caso de la presa Colorines, donde la elevación fue de 1,100 metros. El resto de las presas de las cuales se aprovechó el agua fueron las de Tuxpan, El Bosque, Ixtapan del Oro, Tilostoc, Chilesdo y siendo una de la más importantes la de Valle de Bravo, pues su volumen de almacenamiento es de alrededor de 394 Mm<sup>3</sup> (Figura 6) (Abedrop, et al., 2012).

## Propuesta del tren de tratamiento para la potabilización del agua del Acuífero del Valle del Mezquital como fuente alternativa de abastecimiento para el Valle de México

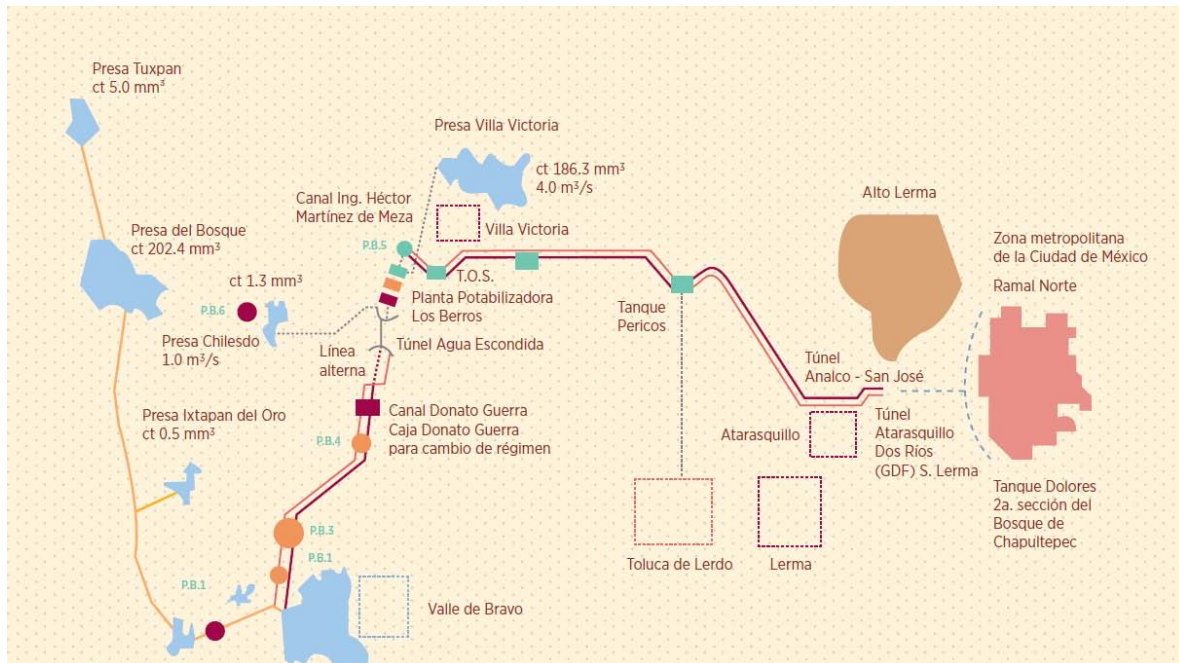


Figura 6. Plano del Sistema Cutzamala

El sistema, que extrae su agua de los caudales del río Balsas, se integra por un acueducto de 140 kilómetros de longitud y que incluye 19 kilómetros de túneles y 7.5 kilómetros de canal; una planta potabilizadora con capacidad de 24 mil litros por segundo y seis plantas de bombeo que, en conjunto, vencen un desnivel de mil 366 metros. Para poder funcionar las 24 horas de los 365 días del año, utiliza mil 650 millones de kilowatts/hora al año, lo que equivale al consumo de electricidad de una ciudad de más de un millón de habitantes. Cutzamala no extrae agua de ningún acuífero. El líquido que pasa por sus ductos y plantas de potabilización y de bombeo proviene de siete presas que acumulan agua de ríos de Michoacán y el Estado de México. Este sistema tiene capacidad para suministrar hasta 19 m<sup>3</sup>/s de agua potable, aprovechando las aguas de la cuenca alta del río Cutzamala, provenientes de las presas Tuxpan y el Bosque, en Michoacán y de Colorines, Ixtapan del Oro, Valle de Bravo y Villa Victoria, en el Estado de México, que anteriormente formaban parte del sistema hidroeléctrico Miguel Alemán, así como de la presa Chilesdo, que aprovecha las aguas del río Malacatepec, explica un documento de la Comisión Nacional del Agua.

El sistema podrá funcionar por otros 30 años a su capacidad total y posteriormente se tendrán que buscar otras fuentes alternas de abastecimiento para el Valle de México. Una alternativa sería la de recolectar el agua de lluvia, que alcanza más de 7 mil millones de metros cúbicos al año. Actualmente, el 80% de esta agua se

evapora y el 11 por ciento se filtra al subsuelo. Del 9 por ciento restante sólo una mínima parte se regula para su aprovechamiento y el resto acaba en el drenaje (CONAGUA, 2012).

### 1.1.3. Sistema Lerma

El sistema Lerma - Chapala tiene un área de 53,591 km<sup>2</sup>, que representa aproximadamente el 3% de la extensión total del territorio nacional. En ella habita el 11% de la población mexicana, y abarca territorios de cinco estados (Figura 6). Su ubicación geográfica está definida por los paralelos 19° 5' y 21° 32' de latitud norte y por los meridianos 99° 22' y 103° 31' de longitud oeste. La máxima altitud se encuentra en el volcán Nevado de Toluca, con 4,690 msnm y su altitud mínima, de 1,600 msnm, se localiza en los alrededores de la Laguna de Chapala (INE, 2003).

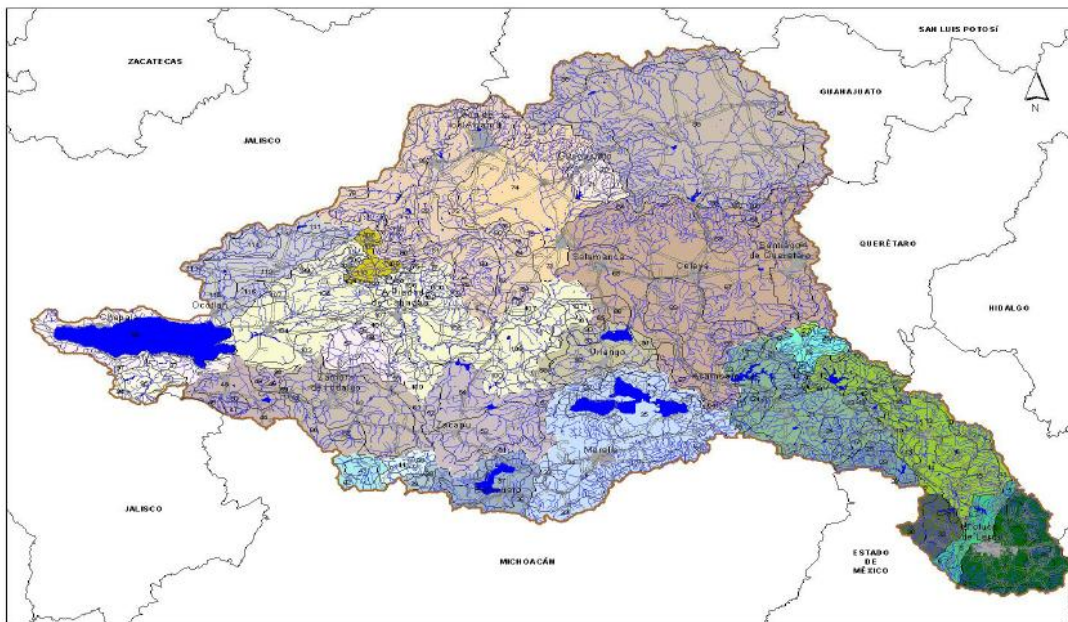


Figura 7. Sistema Lerma

Ante la necesidad permanente de contar con nuevas fuentes de abastecimiento y reducir el impacto por la extracción del agua del subsuelo, el presidente Manuel Ávila Camacho decidió comenzar la construcción de un sistema que permitiera llevar más agua a la Ciudad de México; esta vez fuera de las cuencas del propio valle, al provenir de los manantiales de la laguna de Lerma en el Valle de Toluca.

El desarrollo de esta importante obra hidráulica fue realizado en diferentes etapas, mismas que incluyeron obras de captación de aguas superficiales en Almoloya del Río, Texcaltenango y Alta Empresa, así como la construcción de cajas empotradas

en las rocas de Ameyalco, en el Estado de México. También se captaron aguas subterráneas mediante una galería filtrante de concreto en la ladera de una laguna en Almoloya y se perforaron 5 pozos con profundidades que variaban entre 50 y 308 metros. Se construyó además un acueducto de concreto de 2.5 metros de diámetro y 62 kilómetros de longitud para conducir, a partir de 1951 y por primera vez desde una cuenca circunvecina, 4 metros cúbicos por segundo; la obra fue inaugurada en 1952 e incluyó un sistema de almacenamiento y distribución ubicado en la segunda sección del Bosque de Chapultepec (Abedrop, et al., 2012).

A mediados de la década de 1960, fue necesario llevar más agua a la ZMCM. De esta forma, entre 1965 y 1975, se construyó la segunda etapa del sistema Lerma con la construcción de 230 pozos, lo que incrementó el suministro a 14 m<sup>3</sup>/s. Sin embargo, debido a los impactos ambientales y conflictos sociales derivados de la segunda etapa, el caudal tuvo que ser reducido a 6 m<sup>3</sup>/s. Las relaciones de las autoridades del Distrito Federal con las del Estado de México han estado muy marcadas en gran parte por conflictos relacionados con la operación del sistema Lerma. Para garantizar el abasto de agua a la ZMCM, el gobierno federal ha tratado de compensar a las poblaciones afectadas financiado proyectos de infraestructura (Centro del tercer mundo para el manejo del agua A.C., 2002).

## **1.2. Principales fuentes alternativas**

La sobreexplotación de agua en los acuíferos de la ZMVM causa hundimientos que varían entre los 6 y 28 cm anuales, alcanzando en algunas zonas del oriente del valle de México más de 44 cm por año. Existen cifras estimadas de costos acumulados a valor del año 2012, debido a los hundimientos en casi 75 mil millones de pesos, en la infraestructura urbana como cimentaciones y construcciones particulares, monumentos históricos, agrietamientos, inundaciones, redes de agua potable y drenaje, sistemas de transporte y actividad económica entre otros. Bajo este escenario la ZMVM enfrenta, entre otros, el reto de satisfacer la demanda de agua y mejorar los sistemas de saneamiento; reducir la sobreexplotación del acuífero, controlar los hundimientos del suelo urbano y reducir los riesgos y daños provocados por las inundaciones. Para alcanzar la sustentabilidad hídrica del Valle de México la CONAGUA considera necesario aumentar las fuentes de abastecimiento hacia el Valle desde fuentes externas.

Debido a lo anterior, la CONAGUA, a través de la Coordinación General de Proyectos Especiales de Abastecimiento y Saneamiento (CGPEAS), solicitó y

obtuvo del Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN) Apoyos No Recuperables del 100 por ciento para la elaboración de los estudios de ingeniería básica y anteproyectos para el abastecimiento de agua en bloque al Valle de México.

Actualmente se desarrollan tres proyectos de nuevas fuentes de abastecimiento: sistema Tecolutla - Necaxa, sistema Mezquital y el proyecto Temascaltepec. Los dos primeros son supervisados por la Gerencia de Ingeniería de la Coordinación General de Proyectos Especiales de Abastecimiento y Saneamiento de la CONAGUA. Estas nuevas fuentes podrán contribuir a un equilibrio en los acuíferos del Valle de México dada su sobreexplotación en 18.73 m<sup>3</sup>/s. Los estudios permitirán elaborar los trabajos necesarios para integrar los documentos para la licitación, con la mayor certidumbre posible del proyecto, financiamiento, construcción, operación y mantenimiento de las obras en cada uno de los sistemas (Carmona, et al., 2014).

### **1.2.1. Proyecto Temascaltepec (Cutzamala 4ta Etapa)**

Se le conoce como la cuarta etapa del sistema Cutzamala. Se trata del más reciente programa para aumentar los caudales de agua destinada a una urbe que sigue creciendo. El proyecto es controvertido, como lo han sido todas las grandes obras hidráulicas para la ciudad. Consiste en ampliar la capacidad de abastecimiento, mediante la derivación de una parte del agua del río Temascaltepec para conducirla hasta la Presa Valle de Bravo. Dicha operación se haría construyendo una presa de 400 hectáreas, llamada el Tule cerca al poblado de Temascaltepec. De ella se conduciría el líquido a través de un túnel, elevándolo aproximadamente 450 metros hasta Valle de Bravo (CONAGUA, 2012).

La cuenca del Río Temascaltepec se localiza en el sur-poniente del Estado de México, se origina en la vertiente occidental del Volcán Nevado de Toluca; los arroyos más altos forman el río Verde, el cual registra escurrimientos durante todo el año debido a que su alimentación durante la temporada de estiaje se debe a diversos manantiales que se forman de las filtraciones pluviales y deshielos del volcán, su trazo tiene grandes pendientes y quiebres pero siguiendo la dirección suroeste hasta la población de Temascaltepec. Muy próximo a la población de Temascaltepec se localiza el sitio propuesto para la construcción de la presa donde se tiene programado aprovechar 5 m<sup>3</sup> /s, mediante un bombeo que conduciría los

caudales por un túnel hasta la presa de Valle de Bravo, desde donde se incorporaría al Sistema Cutzamala (Figura 7).

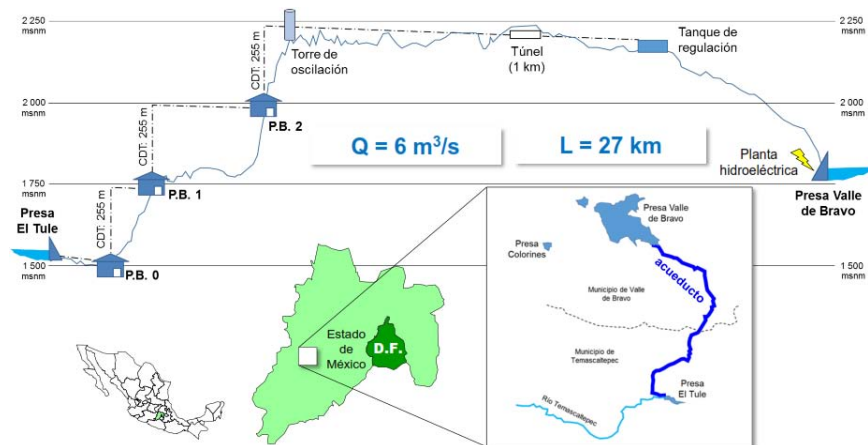


Figura 8. Sistema de la nueva fuente de abastecimiento: Temascaltepec.

### 1.2.2. Sistema Tecolutla -Necaxa

El objetivo del Sistema Tecolutla-Necaxa es entregar agua en bloque en la zona nororiente del Distrito Federal y del Estado de México, en el punto conocido como el cerro de Chiconautla, estado de México. El estudio del Sistema Tecolutla está dividido en tres etapas:

- 1) Estudios técnicos y de ingeniería básica,
- 2) Evaluación socioeconómica y dictamen de un perito valuador externo y,
- 3) Asesoría especializada.

El proyecto contempla suministrar aproximadamente  $9 \text{ m}^3 / \text{s}$  al Valle de México de agua proveniente de las presas de Tenango, Nexapa, Necaxa, La Laguna y Los Reyes que conforman el Sistema Hidroeléctrico Necaxa. Este sistema, situado en la sierra norte del estado de Puebla, fue construido con la finalidad de generación de energía eléctrica al centro del país, iniciando su operación en el año 1905. Se conforma de cinco vasos de almacenamiento: Necaxa, Tenango, Nexapa, La Laguna y Los Reyes, cuya capacidad de almacenamiento total de acuerdo con las curvas de elevaciones-áreas-capacidades (EAC) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) es de 140 millones de metros cúbicos. La zona de estudio se localiza dentro de los límites de los estados de Puebla e Hidalgo.



Los principales elementos hasta ahora considerados para el Sistema Tecolutla-Necaxa, y que podrán sufrir alguna variación conforme avancen los trabajos, son: longitud total aproximada del acueducto de 140 kilómetros, iniciando en la presa Necaxa y llegando hasta el cerro de Chiconautla, en el estado de México, en tuberías con diámetros aproximados de 84 y 100 pulgadas. Se estiman un total de cinco plantas de bombeo, con carga total a vencer de 1,430 metros para los almacenamientos más bajos y de aproximadamente 650 a 700 metros para los almacenamientos altos, y posibilidad de derivaciones en ruta a localidades del estado de Hidalgo. Actualmente se trabaja en balances detallados entre la disponibilidad y las asignaciones de usos consuntivos a fin de aprovechar la mayor cantidad de Agua de las cuencas altas pero sin afectar los compromisos de usos del agua, incluidos los caudales ecológicos (CONAGUA, 2012).

El Sistema Necaxa está integrado por tres divisiones, conformando un total de cinco vasos y/o presas, cuatro centrales hidroeléctricas, obras de captación, canales y túneles. La primera división comprende los vasos de La Laguna, Los Reyes y Necaxa, la segunda División comprende los Vasos de Acatlán y Tenango, y la tercera división comprende el Vaso de Nexapa.

La primera etapa, Estudios técnicos y de ingeniería básica, ya está concluida al 100%. Se prevé que la totalidad de las etapas esté concluida a finales del primer semestre del 2015.

La primera fase contempla únicamente aprovechar los embalses de la zona “alta” del SHN, es decir el embalse de La Laguna (o Tejocotal) y Los Reyes. La primera etapa considera conducir 4.1 m<sup>3</sup>/s con apoyo de 4 plantas de bombeo Los Reyes, La Laguna, PB0-I y PB1-I., para una carga total de bombeo de 652 m dividida en 4 segmentos: desde el embalse de Los Reyes hasta el embalse de La Laguna con un diámetro de 54” y longitud de 6.4 km, el tramo del embalse La Laguna hasta la Planta Potabilizadora presenta una longitud de 3.2 km en 2 tuberías de 84” de diámetro. De la planta potabilizadora al tanque de cambio de régimen (TCR) y de este punto al tanque de entrega ya es un tramo común tanto a la primera como segunda fase. Estos últimos tramos se describen en la segunda fase. La potabilizadora estará ubicada a 10 km hacia el suroeste de Huauchinango, Puebla (Carmona, et al., 2014).

## Propuesta del tren de tratamiento para la potabilización del agua del Acuífero del Valle del Mezquital como fuente alternativa de abastecimiento para el Valle de México

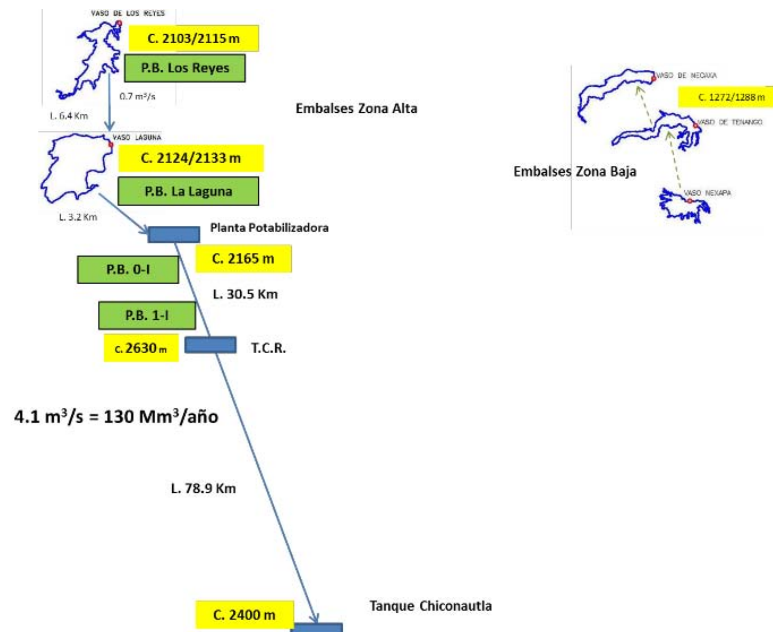


Figura 9. Primera fase del Sistema Tecolutla - Necaxa

La desinfección se llevaría a cabo con ozono y la aplicación de cloro gas, misma que se podría hacer en pre cloración (antes de la coagulación) y en pos cloración (después de la filtración).

El sistema Tecolutla-Necaxa suministraría un caudal objetivo de 12 m³/s (caudal continuo en 24 horas) por lo que la planta potabilizadora tendría una capacidad de diseño de 12 m³/s, en la cota 2,140 msnm, unos 10 metros por encima del nivel máximo del embalse. El proyecto marca un depósito de agua bruta, una planta de proceso y un depósito de agua clara, con unas capacidades aproximadas de 204,000 m³ cada uno (Carmona, et al., 2014).

*El tren de tratamiento propuesto es el siguiente:*

- Pre cloración. Se podrá usar o no en función de las necesidades del operador.
- Ajuste de pH mediante cal. Sólo si es necesario.
- Coagulación con policloruro de aluminio (PAC) o cloruro férrico u otro floculante en función de los resultados de pruebas en jarras.
- Floculación mecánica con poli electrolito catiónico
- Sedimentación de alta tasa
- Ozonación para eliminar olores, cianobacterias, sabores y oxidar materia orgánica.
- Filtración rápida con arena y antracita

- Pos cloración. Dosis media de trabajo en punto de breakpoint para gasificar el amonio cuando se presente.

*Los lodos se tratarán con los siguientes procesos:*

- Espesado
- Desecado en centrífuga
- Cámaras de secado
- Disposición en relleno

La segunda fase considera aprovechar los embalses de la zona “baja”, es decir las presas de Nexapa, Tenango y Necaxa. La presa Necaxa se conectará mediante una conducción de 23.37 km hasta la Planta Potabilizadora. Para esta fase se requerirá de cuatro plantas de bombeo PB0-II, PB1-II, PB2-II y PB3-II, para una carga de bombeo de 936 m. incorporándose 7.2 m<sup>3</sup>/s.

A partir del punto propuesto para la planta potabilizadora, inicia el trazo común a ambas fases, con dos tuberías una para cada fase, dividido a su vez en otros dos segmentos, desde la Planta Potabilizadora hasta el TCR de 84” de diámetro y 30.7 km, donde se instalarán las plantas de bombeo PB0-I y PB1-I y desde el TCR, por gravedad hasta el depósito de Chiconautla en 84 y 72” de diámetro con 78.6 km de longitud.

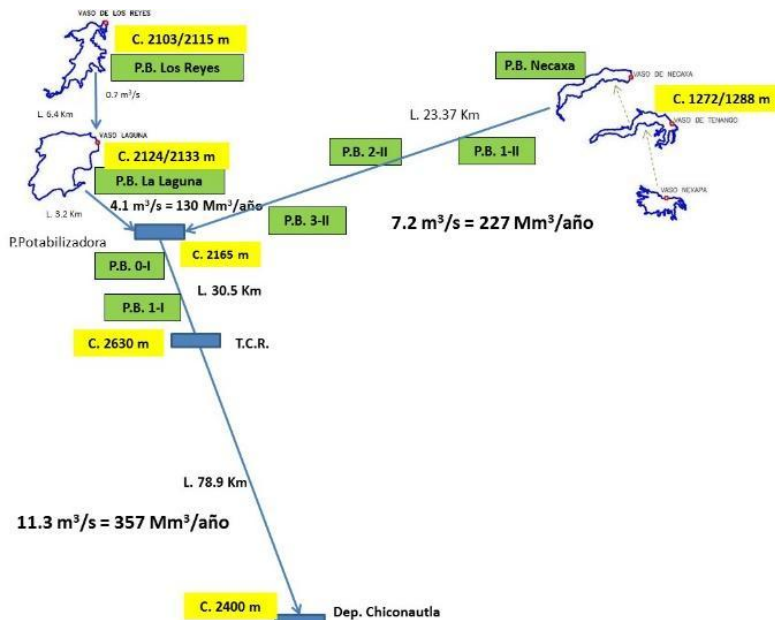


Figura 10. Segunda fase del Sistema Tecolutla - Necaxa

En cuanto a la segunda etapa “Evaluación socioeconómica y dictamen de un perito valuador externo”, actualmente se desarrollan los análisis de la Situación actual del proyecto, que incluye la recopilación y revisión de la información, el diagnóstico de la situación actual, con el análisis de la oferta y la demanda del sistema de abastecimiento de agua a la ZMVM. Además se analiza la situación sin proyecto de inversión, donde se presenta la situación esperada en ausencia del proyecto de inversión (Carmona, et al., 2014).

### 1.2.3. Sistema Mezquital

El Valle de Mezquital se localiza a 80 kilómetros al norte de la Ciudad de México, entre los paralelos 19° 34' y 20° 41.5' de latitud norte y los meridianos 98° 44' y 99° 38' de longitud oeste. Pertenece al estado de Hidalgo y abarca las regiones de Actopan, Mixquiahuala, Ixmiquilpan, Tasquillo, Tula de Allende y Alfajayucan. La topografía es de plana a irregular con elevaciones en el Valle entre los 2,000 y 2,150 msnm rodeado por mesetas, cerros y sierras (Figura 9).



Figura 11. Ubicación y acuíferos del Valle del Mezquital.

De acuerdo con los estudios realizados al 31 de marzo de 2011 por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), la disponibilidad media anual de agua subterránea en los acuíferos de la zona del Valle del Mezquital (Mezquital, Ixmiquilpan, Actopan-Santiago, Ajacuba y Tepeji del Río) se estima en aproximadamente 300 millones de metros cúbicos al año, que equivalen a cerca de 10 m<sup>3</sup> /s. Desde 1970, se documentan más de 30 estudios y artículos relacionados con los acuíferos de esta zona. El agua subterránea del Valle del Mezquital se contempla como una fuente de reúso indirecto, segura y confiable con entrega

también en la zona de mayor déficit de agua en el Valle de México, en el nororiente del Distrito Federal y del Estado de México, cuya conceptualización debe incorporar los más recientes avances técnicos y de manejo ambiental para constituirse como un proyecto de reúso indirecto del agua, considerando la fuente de recarga del acuífero, más en el futuro inmediato la construcción de la Planta de Tratamiento de Atotonilco (CONAGUA, 2012).

El Sistema Mezquital se realiza con apoyo al 100 por ciento no recuperable por parte de Banobras. Para un manejo más apropiado está dividido en cuatro etapas:

- 1) Estudios técnicos de geohidrología, calidad del agua, tenencia de la tierra y aspectos sociales en la zona de captación,
- 2) Anteproyecto e ingeniería básica de acueducto y batería de pozos,
- 3) Evaluación socioeconómica, y
- 4) Asesoría especializada.

La primera etapa permitirá realizar un estudio geohidrológico para definir la ubicación, tipos de acuíferos y funcionamiento de los mismos, las zonas más productivas para la explotación de agua y diagnóstico de la calidad del agua en toda la zona de extracción a través de una campaña de muestreo para diseñar pruebas de tratabilidad y procesos de potabilización. Además se analizará la situación de tenencia de la tierra donde será fundamental revisar todas las zonas de captación donde impacta el sistema Mezquital. La primera etapa está concluida al 100%.

Recientemente ha iniciado el Anteproyecto e ingeniería básica de acueducto y batería de pozos (segunda etapa) que está previsto desarrollarla en 18 meses. Se prevé que la totalidad de las etapas esté concluida en el primer semestre del 2017. La primera etapa ya concluida correspondió a revisar la factibilidad del proyecto así como a la revisión de la disponibilidad hídrica del Acuífero Mezquital (AM) de 4.2 m<sup>3</sup>/s. En la segunda etapa se contempla la ingeniería básica de todo el sistema incluyendo las baterías de los pozos, líneas de interconexión entre ellas, acueducto o línea de conducción, plantas de bombeo, planta potabilizadora y posibles abastecimientos en ruta (Carmona, et al., 2014).

Los resultados de la primera etapa proponen perforar 143 pozos divididos en 12 baterías, a 200 m de profundidad distribuidos en la zona del Mezquital y con 200

km aproximadamente de líneas de interconexión con rebombes en caso de ser necesarios. Las aguas serán tratadas en las plantas potabilizadoras que resulten, pues está en proceso la selección del sitio, así como el número de las mismas en función de la calidad del agua y de los arreglos para las diferentes baterías propuestas. Para la potabilización, de acuerdo a los resultados, se sugiere aplicar los procesos de filtración → carbón activado → prefiltración → nanofiltración → remineralización → cloración.

En los próximos años, al entrar en operación la PTAR Atotonilco, se modificará la composición del agua del acuífero mejorando su calidad. En los primeros años de uso del agua de la PTAR, prácticamente no se percibirá la modificación de la calidad del agua del acuífero. Los beneficios se observarán gradualmente en un periodo de 20 años aproximadamente (Carmona, et al., 2014).

Por lo anterior, las bases de diseño de la planta potabilizadora se deberán de realizar tomando en cuenta la calidad actual del agua del acuífero. Cambios en la calidad del agua del influente de la planta potabilizadora se reflejarán a largo plazo. El proyecto también incluye un acueducto de aproximadamente 80.2 km de longitud con carga estática de 500 m. El agua potabilizada se conducirá hasta entregarla en bloque a un tanque de proyecto que se ubicará en el cerro de Chiconautla, en el Estado de México, con una cota de 2,400 msnm que domina la ZMVM (mismo sitio de entrega del Sistema Tecolutla - Necaxa). Se tienen planteadas ocho alternativas para el acueducto en donde se definirán las poblaciones a abastecer en ruta. Se considera una tubería de 1.83 m (72") de diámetro que se ajustará en función del diámetro económico, con tres plantas de bombeo y sus respectivos dispositivos para el control de transitorios (Figura 10). Para el material del acueducto también se revisarán alternativas incluyendo los costos por operación y mantenimiento así como su relación con la agresividad del suelo (los estudios de geotecnia están considerados dentro de los alcances de la segunda etapa del proyecto) (CONAGUA, 2012).



Figura 12. Esquema del sistema del Valle del Mezquital.

Con estos antecedentes, el proyecto del Mezquital incrementará en  $4.2 \text{ m}^3/\text{s}$  la cantidad de agua destinada para el abastecimiento de la ZMVM.

## 2. Principales estudios y resultados de la calidad del Agua en el Valle del Mezquital

El acceso al agua potable, además de la problemática que implica el control y prevención de contaminación de las fuentes de abastecimiento por las emisiones y descargas de sustancias tóxicas asociadas a las actividades industriales y a las descargas domésticas, representa una de las principales fuentes de contaminantes emergentes, debido al uso indiscriminado principalmente de detergentes, productos para el cuidado personal, fármacos, hormonas y antibióticos que en la actualidad emergen como contaminantes que impactan a la salud pública, la vida silvestre y al ambiente en general.

Los últimos estudios de calidad del agua realizados en el Valle del Mezquital (Leseer 2013) corroboran la presencia de contaminantes emergentes en el agua subterránea, agua superficial (manantiales) y canales (Carmona y Muñiz, 2014).

Existen diversos estudios sobre la calidad del agua y el grado de contaminación de los suelos en el Valle del Mezquital, entre ellos se encuentran el de Huerta y colaboradores y el de Reyes y colaboradores, los cuales se enfocaron al grado de contaminación de los suelos irrigados con las aguas residuales (Huerta et al., 2002; Reyes Solís et al., 2009), otros estudios han encontrado ya evidencias de contaminación en el agua subterránea (Marín et al., 1998). Gallegos et al. (1999) encontraron contaminación orgánica (nitratos y coliformes fecales y totales) en

muestras de agua subterránea en el valle del Mezquital, especialmente en las muestras someras. Page et al. (2010) realizaron un estudio de riesgo microbiológico y concluyen que el riesgo de contaminación del acuífero es alto debido a la falta de un pretratamiento del agua residual recargada y al poco tiempo de residencia del agua descargada al acuífero. Otros estudios como el de Lesser, et al. (2011), determinaron la calidad del agua en 65 pozos analizados químicamente, encontrando que el sodio y los sólidos totales disueltos se encuentran por arriba del límite máximo permisible y en 30 de 75 pozos analizados bacteriológicamente, detectaron coliformes totales y fecales. Carmona y Muñiz (2014), reportan que la contaminación emergente existe en el Valle del Mezquital, sin embargo el avance de tecnologías permite potabilizar el agua para consumo humano.

## **2.1. Composición y caracterización del Agua en el Valle del Mezquital**

En la actualidad el acuífero del Valle del Mezquital, se utiliza como fuente de abastecimiento para los municipios comprendidos en su interior (Tula, Atitalaquia, Tezontepec de Aldama, Atotonilco de Tula, Mixquiahuala, Progreso de Obregón, entre otros), esta agua solamente pasa por un sistema de desinfección (colro), con lo que existe la posibilidad de que la población esté expuesta a una cantidad y diversidad desconocida de contaminantes traza y compuestos orgánicos potencialmente tóxicos.

Actualmente millones de compuestos químicos naturales y sintéticos se encuentran en el ambiente y tienen el potencial de ingresar al agua, miles de productos químicos han sido creados por las actividades humanas y muchos de ellos son fabricados para aliviar, limpiar, mejorar el confort y el progreso del hombre, el problema de la dispersión de estos químicos una vez que son desechados o eliminados por nuestro cuerpo, es que pueden acumularse en el agua. Todos estos químicos utilizados por el hombre llegan a las plantas de tratamiento de aguas residuales y pueden pasar a través de sus procesos unitarios sin sufrir modificación alguna. En México el efluente de la mayoría de estas plantas de tratamiento es descargado a los distritos de riego, permitiendo que estos contaminantes puedan ingresar a los acuíferos en forma de trazas, por otro lado, una amplia gama de pesticidas usados en la agricultura y otros propósitos han contribuido a la contaminación de cuerpos de agua superficial y subterránea.

Se ha estudiado la calidad del agua superficial y subterránea del Mezquital, los estudios han detectado por arriba de la Norma NOM-127-SSA1-1994: sodio,



arsénico, coliformes totales, coliformes fecales, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, fierro, sulfatos, cloruros, dureza, manganeso, aluminio, fluoruros, bario, fosfatos, mercurio, plomo, cadmio, cobre y zinc. Además se han detectado 23 de los 224 parámetros de contaminantes “no regulados” (cafeína y naproxeno entre otros) en 30 sitios, principalmente se encontraron en el agua de los canales con concentraciones bajas y solamente trazas o ultratrazas en el agua subterránea. Diferentes autores coinciden en que los metales tienden a ser retenidos por la capa superficial del suelo, por lo cual el agua subterránea aprovecha un primer tratamiento natural del suelo a la hora de filtrarse al subsuelo. Esta situación debe mejorar cuando entre en operación la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Atotonilco (Carmona, et al., 2014).

Lesser, et al., en el 2011, realizaron un análisis físico-químicos en 65 zonas del Valle del Mezquital, (Figura 11), los resultados fueron comparados con los límites permisibles (LP) para agua de uso y consumo humano, establecidos en la norma oficial NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000), y se determinó que el Na y los sólidos totales disueltos (SDT) generalmente se encuentran por arriba del LP.

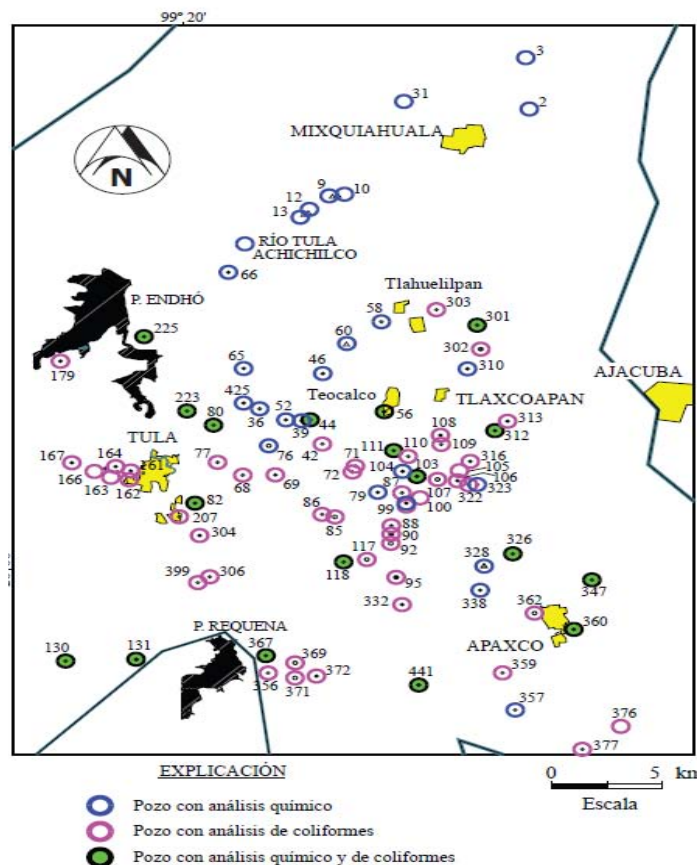


Figura 13. Zonas muestreadas para los análisis físico-químicos. Tomado de Lesser, et al., en el 2011.

Con relación a las determinaciones de elementos químicos, se detectó arsénico en siete aprovechamientos localizados al sur de Tlaxcoapan. La mitad de los sitios analizados presentan fluoruros por arriba de la norma; respecto al plomo, la mayoría supera el límite máximo permisible. Los fosfatos y el boro también se presentan en concentraciones altas en muchas de las muestras (Tabla 3). Los STD en las muestras de agua analizadas se encuentran con concentraciones entre 196 y 300 mg/l de STD en el extremo sur del área de estudio. En el extremo norte, alrededor de Xochitlán, los aprovechamientos MZ-27 y MZ-31 presentan menos de 800 mg/l y los cuatro aprovechamientos restantes tienen entre 1060 y 1224 mg/l.

En la parte central del valle del Mezquital, la mayor parte de los aprovechamientos analizados presentan poco más de 1000 mg/l de STD y únicamente el pozo MZ-103 presentó una concentración de 4052 mg/l. En la parte sur del valle, las concentraciones varían entre 2044 y 2812 mg/l de STD. En la zona de Jilotepec-Taxhimay las concentraciones de boro son del orden de 0.035 mg/l. En el valle del Mezquital se encuentran concentraciones relativamente altas, entre 0.880 y 2.067 mg/l en la zona entre Tula y Teocalco. También se detectaron valores entre 1.250 y 2.039 mg/l al sur de Tlaxcoapan y concentraciones de 1.019 a 2.206 mg/l al noroeste de Apaxco. De los setenta y cinco análisis bacteriológicos hechos en pozos de agua potable, 25 reciben cloración. De la totalidad de análisis, 30 pozos (40%) presentaron coliformes totales, y también en 8 de ellos a pesar de que reciben cloración; en varias de estas captaciones también se encuentran coliformes fecales. Estas bacterias deberían de estar ausentes en el agua de uso y consumo humano de acuerdo a la normatividad vigente.

Propuesta del tren de tratamiento para la potabilización del agua del Acuífero del Valle del Mezquital como fuente alternativa de abastecimiento para el Valle de México

Tabla 3. Resultados de los análisis físico - químicos de las zonas muestreadas.

POZO No.	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	STD (mg/l)	HCO <sub>3</sub> (mg/l)	C.E. (µmhos/cm)	TEMP. (°C)	pH
LP	-	-	200	-	250.00	400	1,000	-	-	-	-
MZ-2	61.6	43.8	209	31.3	193	131	1,148	471	1,051	25.0	7.20
MZ-3	61.6	40.0	241	45.1	225	134	1,224	501	1,683	25.9	7.20
MZ-9	122	43.1	209	31.0	226	211		481	1,579	33.0	7.50
MZ-10	67.7	72.6	145	18.3	103	395	1,080	306	1,568	34.2	6.50
MZ-12	84.5	38.1	205	42.9	230	133		445	1,723	24.2	7.30
MZ-13	77.0	39.2	203	35.2	171	169	1,192	477			
MZ-22	26.9	14.7	366	16.7	306	107	1,132	440	1,709	39.5	7.40
MZ-27	64.6	37.1	87.6	13.7	85.5	87.0	768	353	1,043	25.7	7.50
MZ-28	16.9	11.2	293	43.2	196	99.5	1,060	446	1,435	20.7	7.80
MZ-31	33.9	42.5	46.0	2.61	36.0	81.7	496	270	606	25.3	7.30
MZ-36	248	81.3	284	45.9	263	862	2,284	346			
MZ-39	95.4	26.5	340	51.9	285	280		499			
MZ-44	103	32.4	310	33.9	207	381	1,540	452	2,135	24.2	7.30
MZ-46	89.9	29.9	230	34.0	230	92.1	1,120	528			
MZ-52	123	44.8	229	30.4	166	467	1,292	379	1,808	15.5	7.50
MZ-56	63.1	37.1	193	49.3	135	306	1,000	320	1,460	25.3	7.20
MZ-58	96.2	27.5	221	26.9	175	180	1,120	487	1,693	16.9	7.50
MZ-60	84.6	32.1	252	46.1	157	279	1,208	483	1,691	21.0	7.50
MZ-65	133	48.1	226	40.0	259	209	1,428	538			
MZ-66	117	58.0	208	42.9	294	163	1,304	497			
MZ-76	70.0	21.3	211	26.5	167	99.3	1,004	463	1,336	17.7	7.30
MZ-79	76.7	29.4	80.5	28.8	93.0	159	744	252	958	22.9	7.38
MZ-80	175	40.6	194	38.1	247	321	1,540	431	1,825	19.5	7.43
MZ-82	113	24.3	131	36.4	186	101	1,012	384	1,162	18.1	7.50
MZ-100	115	28.4	128	20.8	96.0	319	1,040	260	1,402	24.5	7.35
MZ-103	475	126	496	43.6	405	1,621	4,052	559	3,850	25.1	7.16
MZ-104	36.7	16.2	183	31.5	97.6	177	860	302			
MZ-111	148	57.9	194	44.7	206	499	1,520	282	1,702	23.2	7.31
MZ-118	541	86.2	116	28.2	335	1,103	2,812	352			
MZ-130	40.0	11.2	35.3	5.47	29.5	20.3	344	193	393	22.1	7.10
MZ-134	31.7	10.1	48.8	13.6	36.3	19.8	384	197	402	23.9	7.55
MZ-215	40.9	16.6	61.8	4.60	50.8	32.6	444	231	588	12.6	7.28
MZ-218	80.1	26.9	81.1	4.30	65.3	177		237			
MZ-223	158	41.5	155	28.0	179	330		366			
MZ-225	94.8	69.7	123	34.0	177	171	1,152	451			
MZ-241	13.3	7.10	29.5	3.49	25.0	11.3	252	95.5	216	27.5	8.20
MZ-242	16.4	6.60	29.6	5.19	23.6	4.90		118		26.2	7.54
MZ-243	20.0	11.2	15.5	5.22	11.3	17.4	276	117	224	18.9	7.56
MZ-246	13.3	10.1	18.0	4.73	9.10	20.1	232	99.5	173	24.1	7.64
MZ-251	23.3	11.2	14.5	4.48	20.4	30.5	252	91.5	260	17.8	6.41
MZ-255	18.4	6.10	18.9	4.23	11.3	11.5	232	105	211	17.9	6.81
MZ-266	15.0	8.10	9.91	2.50	6.80	25.1	196	69.7	185	21.5	7.54
MZ-270	38.4	6.10	10.6	2.25	11.3	44.3	244	97.5	344	14.1	7.64
MZ-274	21.7	5.10	20.3	3.24	6.80	20.1	236	111	208	17.3	7.46
MZ-275	13.3	2.00	45.5	4.94	18.2	15.2	244	123	195	25.4	7.43
MZ-279	35.0	11.1	32.0	6.34	18.2	44.8	300	159	418	24.5	7.70
MZ-286	13.9	2.70	29.6	4.38	6.80	13.7	184	109	193	19.5	7.33
MZ-292	10.9	3.30	14.0	4.00	16.3	6.95		53.5	87.0	9.80	8.03
MZ-295	5.50	5.00	10.8	2.51	12.7	5.10		47.5	69.0	16.7	
MZ-301	75.0	33.5	253	18.0	213	132	1,308	517	1,740	20.6	7.23
MZ-310	73.3	22.3	267	21.5	195	161	1,232	489	1,618	21.0	7.26
MZ-312	103	48.7	214	34.7	292	71.5	1,368	543	1,649	18.9	7.27
MZ-323	123	54.8	245	17.6	287	142	1,448	597	1,710		7.30
MZ-326	233	48.2	251	51.3	197	561	2,044	459	2,300	26.5	7.25
MZ-327	375	50.7	327	48.0	403	799	2,704	537	3,700	44.1	7.10
MZ-338	215	46.4	359	45.9	390	455	2,108	586	1,465	22.0	7.20

Tomando en cuenta los principales aniones y cationes, se clasificó el agua subterránea de acuerdo a su composición química. Se encontraron tres principales tipos o familias de agua: 1) Agua del tipo sódico-mixta, que se encuentra en los aprovechamientos al poniente de Tlahuelilpan y Teocalco. 2) Familia mixtasulfatada, que se presenta en varios pozos de la parte sur del valle de

Mezquital y que están relacionados con sedimentos evaporíticos del tipo de yesos y anhidritas. 3) Familia mixtabicarbonatada, que corresponde con agua de lluvia de reciente infiltración que se presenta en pozos y manantiales del poniente del valle del Mezquital, así como en la zona de Jilotepec y San Luis Taxhimay. Las aguas mixtas son aquellas en las cuales no predomina ningún ión (anión o catión) en especial.

A partir del análisis de resultados de los estudios realizados sobre calidad del agua en el Valle del Mezquital (II-UNAM, 2000; Lesser 2007-2008; II-UNAM 2008; FG y Asociados, 2009) mencionan que algunos de los contaminantes fueron encontrados en trazas o micro-trazas por lo que no consideran su presencia como riesgo; sin embargo, existen contaminantes emergentes en micro trazas que son tóxicos para el ser humano.

En el último estudio de calidad del agua del Valle del Mezquital realizado por Lesser y asociados en el 2013, se muestrearon 30 sitios distribuidos en el valle, 2 en manantiales, 19 en pozos y 9 en canales (Figura 12).

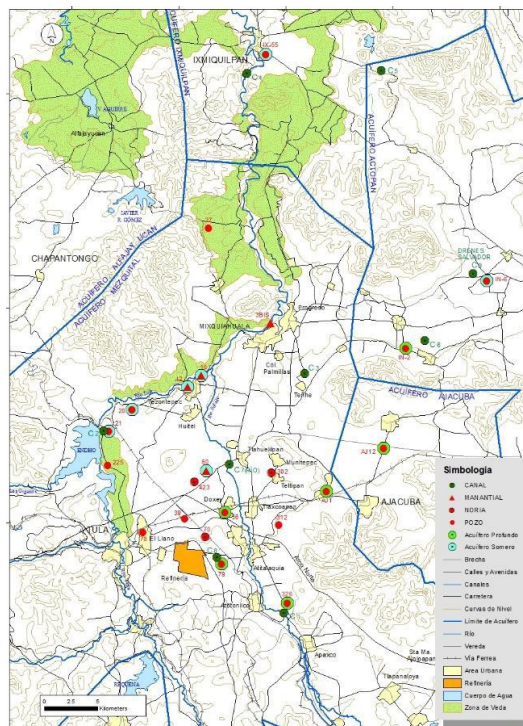


Figura 14. Sitios muestreados para contaminantes emergentes. Tomado de Lesser y asociados en el 2013.

Se analizaron 224 compuestos emergentes, 118 compuestos son originados por fármacos y productos para el cuidado personal, 7 hormonas y 99 compuestos

originados por fenoles etoxilados, compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles. Los resultados muestran que solo 23 compuestos de los 224 fueron identificados en los pozos y 67 en los canales del Valle del Mezquital, el resto de las determinaciones dieron como resultado ND (no detectado). Ninguna de las hormonas fue detectada en los pozos.

Los compuestos que en más ocasiones fueron detectados en los 19 pozos analizados son (Etilhexil) ftalato, Dibutilftalato y DEET (Figura 13).

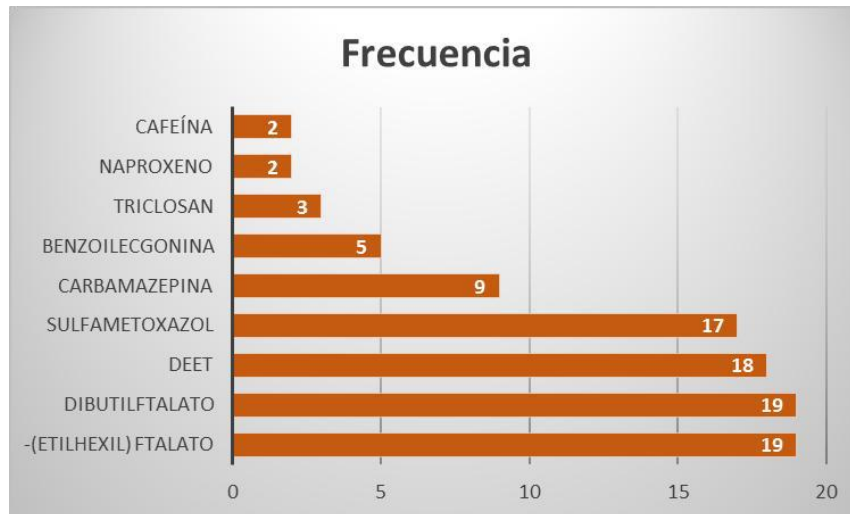


Figura 15. Compuestos con mayor frecuencia encontrados en 19 pozos. Tomado de Carmona y Muñiz, 2014.

Los compuestos como DEET, Sulfametoxazol, Carbamazepina, Benzoilecgonina y Cafeína se encontraron en el estudio realizado por el IMTA, 2010 en 18 pozos muestreados. La Carbamazepina, Naproxeno, Triclosan y BIS- 2-(etilhexil) ftalato se detectaron por los estudios realizados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2008.

Las fuentes muestreadas por el IMTA y Lesser coinciden en 8 pozos. El Sulfametoxazol, DEET, Carbamazepina, se detectó en los manantiales Cerro Colorado (IMTA, 2010 y Leseer y asociados, 2013) y Tezontepec (Leseer y asociados, 2013) (Tabla 4).

Tabla 4. Contaminantes que concuerdan en los últimos tres estudios realizados en el Valle del Mezquital. Tomado de Carmona y Muñiz, 2014.

LESSER 2013	IMTA 2010	I.I. UNAM (2008)
Cocaína	Cocaína	ND
Cafeína	Cafeína	ND
Carbamazepina	Carbamazepina	carbamazepina
DEET	DEET	ND
Naproxeno	ND	naproxeno
Sulfametoxasol	Sulfametoxasol	ND
Bis-2-(etilhexil)ftalato	ND	di-2-etilexilftalato (DEHF)
Benzoilecgonina	Benzoylecgonina	ND
Triclosan	ND	triclosan

Estos resultados indican que los contaminantes emergentes se encuentran presentes en tiempo y espacio. Estos compuestos pertenecen a diferentes grupos (hormonas, productos para el cuidado personal, industriales, fármacos y antibióticos) (Tabla 5).

Tabla 5. Diferencias de los contaminantes que se han encontrado en los últimos tres estudios. Tomado de Carmona y Muñiz, 2014.

LESSER 2013	IMTA 2010	I.I. UNAM (2008)
Anfetamina	Metilprednisolona	bisfenol-A
Ormetoprim	Eritromicina-H2O	ibuprofeno
Dibutil ftalato	17-β-estradiol	ácido salicílico
Ofloxacina	acetato de 17-β-estradiol	butilencilftalato
Diltiazem	17-α-etinil estradiol	nonilfenol
Sulfadiazina	Cloroformo	
Flumequina	benceno	
Sulfametazina	Dicloropropano	
Meprobamato	Tricloroetano	
Sulfadimetoxina	Dicloroetano	
Metformina	Tolueno	
Teofilina	Diclorobutano	
Cloxacilina	Dimetilamina	
Oxacilina	1-Cloro-2-metil-1-propeno	
	1,2-Dicloro-2-metilpropano	
	1,1-Dicloro-1-nitroetano	
	1,2-Diclorobutano	
	2-Clorometil-1,3-dicloro-2-metilpropano	
	1,3-Diclorobutano	
	1,2,3-Tricloro-2-metilpropano	
	Tetraclorobutano	
	Cloro-2-buteno	
	1-Bromo-2,3-diclorobutano	
	1,1,3,3-Tetracloro-2-metilpropano	
	1,3-Dicloro-2-metilpropano	
	ácido clofibrico	

De acuerdo con el estudio realizado por el IMTA, 2010, se identificaron 32 contaminantes emergentes de los cuales 21 corresponde al grupo de los compuestos orgánicos, volátiles, semivolátiles y fijos; 8 a fármacos y 3 hormonas; de los contaminantes identificados, solo los fármacos coinciden con los resultados de Leseer y asociados, 2013.

El tipo de materiales en el subsuelo que se encuentran en el Valle del Mezquital permiten la atenuación natural en la zona no saturada a un gran número, pero no todos los contaminantes del agua que recargan o llegan a los acuíferos. Durante muchos años, la naturaleza ha actuado como un sistema potencialmente efectivo para mejorar de manera gradual la calidad del agua que se infiltra en los diversos materiales de la zona de aireación, sobre todo si los materiales trabajan como filtros naturales tal y como lo hacen las arenas y gravas.

Los procesos involucrados en la atenuación de contaminantes son: dilución, filtración, neutralización, oxidación-reducción, precipitación-disolución, adsorción-desorción, degradación biológica y síntesis celular, éstos continúan, en menor grado, a mayores profundidades, especialmente en donde se encuentran sedimentos no consolidados en la zona no saturada. Adicionalmente, la dispersión hidrodinámica asociada con el flujo del agua subterránea ocasiona la dilución de contaminantes móviles y persistentes, especialmente en la zona saturada de los acuíferos.

El triclosán, ormetropim, anfetamina, cocaína y dibutil ftalato ocupan los primeros lugares de toxicidad en la lista, los primeros cinco contaminantes pertenecen al grupo de fenoles etoxilados a excepción del ormetropim que corresponde al grupo de los fármacos y productos para el cuidado personal (Tabla 6).

**Tabla 6. Contaminantes ordenados de mayor a menor riesgo. Tomado de Carmona y Muñiz, 2014.**

Número CAS	ID	Nombre	Medio de estancia	Ubicación del muestreo
3380-34-5	1	Triclosan	0% agua dulce 99.9% suelo agrícola	agua subterránea y agua superficial (canales) Lesser (2013); acuífero (II-UNAM)
6981-18-6	2	Ormetoprim	n/d	Pozo y/o manantial
300-62-9	3	Anfetamina	n/d	pozos, manantiales y canales
50-36-2	4	Cocaína	n/d	pozos y agua de rechazo
84-74-2	5	Dibutil ftalato	0.2% agua dulce 99.6% suelo agrícola	agua subterránea y agua superficial (canales)
82419-36-1	6	Ofloxacina	n/d	pozo, manantial y canales
298-46-4	7	Carbamazepina	n/d	pozos, manantial cerro colorado (IMTA, 2010); agua superficial y subterránea (Lesser, 2013); acuífero (II-UNAM)
42399-41-7	8	Diltiazem	n/d	pozos, manantiales y canales
68-35-9	9	Sulfadiazina	7.9% agua dulce 89.2% suelo agrícola	pozos o manantial y canales
22204-53-1	10	Naproxeno	n/d	agua subterránea y agua superficial (canales) Lesser (2013); acuífero (IIUNAM)
42835-25-6	11	Flumequina	16.1% agua dulce 74.2% suelo agrícola	pozo o manantial
723-46-6	12	Sulfametoxasol	n/d	pozo, manantial cerro colorado y agua de rechazo (IMTA, 2010); agua superficial y subterránea (Lesser, 2013)
117-81-7	13	Bis-2-(etilhexil)ftalato	0% agua dulce 100% suelo agrícola	agua subterránea y agua superficial (canales)
57-68-1	14	Sulfametazina	3.5% agua dulce 95.2% suelo agrícola	pozo o manantial y canales
57-53-4	15	Meprobamato	n/d	pozo o manantial y canales
58-08-2	16	Cafeína	16.0% agua dulce 81.6% suelo agrícola	pozos y agua de rechazo (IMTA, 2010), subterránea y superficial (Lesser)
134-62-3	17	DEET	5.1% agua dulce 92.2% suelo agrícola	pozo, manantial cerro colorado, agua de permeado y agua de rechazo (IMTA, 2010); agua superficial y subterránea (Lesser, 2013)
122-11-2	18	Sulfadimetoxina	n/d	pozos y manantiales
657-24-9	19	Metformina	n/d	pozos, manantiales y canales
58-55-9	20	Teofilina	16.0% agua dulce 81.6% suelo agrícola	agua subterránea (pozo o manantial) y agua superficial (canales)

Con respecto a los patógenos, de las 1,407 especies de microorganismos que se sabe causan enfermedades en seres humanos, 177 (13%) especies se consideran emergentes o reemergentes y, de ellas, 77 (37%) son virus o priones; 54 (10%), bacterias; 22 (7%), hongos; 14 (25%), protozoos y 10 (3%), helmintos. Estos patógenos no están asociados con un hospedero animal específico y pueden persistir en reservorios animales diversos, ya sean mamíferos o no, además de poseer una flexibilidad biológica que les permite aprovechar las oportunidades epidemiológicas que se presentan (Woolhouse and Sonya, 2005).

## 2.2. Principales contaminantes a remover

Dado el origen del agua que llega al Valle del Mezquital, los llamados contaminantes emergentes químicos y biológicos, han cobrado gran importancia. De éstos existe poca información sobre su toxicidad, transformación y transporte



ambiental, así como la frecuencia y concentración con la que pueden estar presentes en diferentes cuerpos de agua.

La tabla 7 muestra un resumen de los principales contaminantes que han rebasado los límites máximos permisibles de acuerdo a la Norma Mexicana NOM-127-SSA-1-1994, los criterios de la calidad del agua de la Comunidad Económica Europea (Gray, 1994), de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011), y las concentraciones máximas de United States Environmental Protection Agency (EPA, 2012).

Tabla 7. Resumen de los principales parámetros que rebasan la Norma.

Tipo	Parámetros
Fisicoquímicos	Bicarbonatos, Carbonatos, Color, Conductividad, Cloruros, COT, Dureza Total, Nitratos, Sulfatos, SDT, Turbiedad SAAM.
Contaminantes Emergentes	Triclosán, Ormetopim, Anfetamina, Ibuprofeno, 2,4 D, Ketoprofeno, Acido Salicílico, Diclofenaco, Gemfibrozil, Acido Clofibrico, Nonil Fenoles, Butil Bencil Ftalato, Carbamazepina, Esteron, Estradiol, Pentaclorofenol, Naproxeno, etc.
Biológicos	Coliformes Totales, Coliformes Fecales, Salmonella ssp, Bacteriófagos y Giardia ssp.
Químicos	Mercurio, Plomo, Sodio, Boro, Fierro, Cadmio

Sin embargo, últimamente se ha centrado la atención en los contaminantes emergentes ya que se ha demostrado que estos compuestos se encuentran diseminados en el ambiente y se han detectado en fuentes de abastecimiento de agua superficial y subterránea. Los contaminantes emergentes corresponden en la mayoría de los casos a contaminantes no regulados que pueden ser candidatos a regulación futura.

La Environmental Protection Agency (EPA) define a los contaminantes emergentes como aquellas sustancias que no tienen estándares que las regulen y que son potenciales agentes de daño o de efectos nocivos a la vida silvestre, acuática y/o terrestre, incluyendo al hombre.

Globalmente no se ha identificado o definido un número aceptado de contaminantes emergentes en el ambiente ya que por un lado el avance tecnológico de los últimos años, ha propiciado el surgimiento de un sinnúmero de compuestos químicos en su mayoría tóxicos; por otro, las metodologías analíticas y técnicas de análisis en laboratorio de mayor sensibilidad ha permitido la identificación de una enorme diversidad de compuestos cuya presencia en el ambiente había pasado inadvertida con escaso conocimiento de las implicaciones ambientales de esta clase de contaminación emergente. Entre los compuestos emergentes recientemente catalogados se encuentran los surfactantes, los productos farmacéuticos, los productos de aseo y cuidado personal y, los aditivos a la gasolina (Carmona y Muñiz, 2014).

Los 20 contaminantes emergentes principales se muestran en la tabla 7, estos son los principales contaminantes a remover en el agua del Valle del Mezquital, los contaminantes aparecen de mayor a menor riesgo y ecotoxicidad. Esta imagen da una clara idea de la presencia de contaminantes que aun en micro trazas pueden ocasionar impactos a la salud. La tabla da un orden lógico para identificar las sustancias a las que se les debe dar mayor seguimiento en los próximos estudios.

**Tabla 8. Principales contaminantes emergentes.**

ID	Nombre de la sustancia	Posición de la sustancia: de la más tóxica a la menos tóxica	Concentración HC50 (mg/l)
1	Triclosan	1,353	0.0497
2	Ormetoprim	2,186	0.148
3	Anfetamina	4,701	1.01
4	Cocaína	4,938	1.16
5	Dibutil ftalato	5,063	1.27
6	Ofloxacina	5,858	1.98
7	Carbamazepina	5,913	2.03
8	Diltiazem	7,138	3.97
9	Sulfadiazina	7,336	4.42
10	Naproxeno	7,471	4.74
11	Flumequina	7,814	5.57
12	Sulfametoxazol	8,046	6.31
13	Bis-2-(etilhexil)ftalato	8,303	6.71
14	Sulfametazina	9,450	12.6
15	Meprobamato	10,902	24.6
16	Cafeína	11,124	27.2
17	DEET	12,203	40.6
18	Sulfadimetoxina	12,854	57.4
19	Metformina	14,553	106
20	Teofilina	16,633	503

Adicionalmente, se desconoce en gran medida el tipo y magnitud de los efectos adversos a la salud pública y al ambiente que pudiesen estar asociados con la exposición a la mayoría de los compuestos orgánicos emergentes y no regulados en el mediano y largo plazo.

La microbiología sanitaria tradicional está siendo cuestionada por la emergencia de patógenos que muestran una gran tolerancia a factores ambientales e incluso a estrés ambiental además de resistir procesos de desinfección estándar.

La Secretaría de Salud (2008) reporta que debido a enfermedades crónicas no transmisibles a partir de la década de los 90 se incrementó la causa de muerte en la población general, como enfermedades del corazón y tumores malignos, dejando atrás a las enfermedades infectocontagiosas. La exposición a los contaminantes emergentes puede ser uno de los factores para el aumento de estas enfermedades (Carmona y Muñiz, 2014).

Los tratamientos terciarios que emplean filtración por membranas como la nano filtración o la ósmosis inversa, teóricamente podrían ser capaces de reducir totalmente la presencia de los contaminantes emergentes detectados en el Valle, esto sucede debido al tamaño; sin embargo, la eliminación no es total, e incluso se ha demostrado que compuestos orgánicos con peso molecular significativamente superiores a 100 y 200 Daltons pueden aparecer en los permeados de ósmosis inversa.

En el caso de membranas de NF se ha demostrado que algunas eliminan estrona y estradiol por exclusión por tamaño, y otras lo hacen por adsorción debido a las interacciones polímero-contaminante. Los mecanismos que intervienen en el rechazo de los contaminantes en los tratamientos de NF y OI son numerosos, entre los que cabe citar: propiedades fisicoquímicas del contaminante, interacciones hidrofóbicas entre el soluto y la membrana, material de la membrana, colmatación, pH de la alimentación, exclusión electrostática, etc.

Para la potabilización del agua del Mezquital se sugiere aplicar los procesos de filtración → carbón activado → prefiltración → nanofiltración → remineralización → cloración. Debido a que el acuífero del Valle del Mezquital es una fuente potencial para abastecimiento de agua a la Zona Metropolitana del Valle de México

(ZMVM), la remoción de estos contaminantes cobra relevancia por ser un proceso de potabilización no convencional (Carmona, et al., 2014).

Con base en los estudios realizados por diferentes autores (Jiménez et al., 2008, IMTA, 2010, Lesser y Asociados, 2013), los cuales sugieren tratamientos con tecnologías como filtración, carbón activado, intercambio iónico, procesos de membranas, ozonación, etc., se realizará un análisis y descripción de estas tecnologías con el fin de proponer el tren de tratamiento adecuado para potabilizar el agua proveniente de dicha fuente.

### **3. Tecnologías actuales de potabilización**

Actualmente existen diferentes tecnologías para potabilizar el agua proveniente tanto de fuentes convencionales como no convencionales, sin embargo, para ser apta para consumo humano el agua requiere de una serie de tratamientos que se establecen acordes a su calidad inicial. La fuente de abastecimiento y las circunstancias en el sitio en particular son los factores que definirán la calidad del agua de dicha fuente, las dificultades que tendrán que enfrentarse para hacerla potable y las complejidades de los tratamientos que se deberán aplicar para convertirla en inocua (una de las características principales que debe cumplir el agua para ser considerada apta para consumo humano) dependerán principalmente de dichos factores (Leal, 2000).

Como ya se mencionó, diferentes autores coinciden en que el tren de tratamiento debe estar conformado (de manera general) por la combinación de las siguientes tecnologías para garantizar la calidad potable:

- Sistemas de filtración
- Procesos de membranas
- Sistemas de adsorción y de intercambio iónico
- Desinfección química y oxidantes

Por lo que se desarrollará una descripción general de estas tecnologías.

### 3.1. Sistemas de Filtración

La filtración es una combinación de procesos químicos y físicos. La filtración mecánica remueve las partículas suspendidas porque las atrapa entre los granos del medio filtrante (por ejemplo, arena). La adhesión juega un papel importante dado que parte del material suspendido se adherirá a la superficie de los granos filtrantes o al material previamente depositado.

Actualmente existe una gran variedad de sistemas de filtración, como son: filtros lentos de arena, filtros de Arena/Antracita, filtros de tierras diatomáceas, filtros empacados, filtros de cartuchos, etc.

**Filtros Lentos de Arena:** Los filtros lentos consisten en camas de un metro de grosor de arena fina sobre una cama de grava de 30 cm de altura y un sistema de drenado. En el caso de los filtros lentos de arena, también son importantes los procesos biológicos, ya que los filtros forman una película delgada de microorganismos que atrapan y destruyen algas, bacterias y materia orgánica, incluso antes de que el agua llegue a los filtros propiamente dichos, son excelentes como pretratamiento para un sistema con membranas.

Sus ventajas residen en que son de bajo costo, confiables, pueden remover algunos microorganismos hasta en 99,9% y la operación y control del proceso son muy sencillas. Sus limitaciones principales son que no pueden remover turbiedades elevadas y que requieren de grandes superficies pues se operan bajo velocidades pequeñas (EPA, 1990).

**Filtros de Arena/Antracita:** La antracita es un excelente medio de filtración para clarificación del agua en uso potable o industrial, cuando es usada en combinación con arenas filtrantes. Es un carbón mineral, de color negro, brillante, con gran dureza, presenta mayor contenido en carbono, hasta un 95%.

Debido a la forma especial de sus granos permite que el material que se encuentra en suspensión sea retenido en la profundidad del lecho filtrante. En comparación con un filtro de arena, este medio filtrante permite un desempeño en el filtro de mayor flujo, menos caída de presión y un mejor y rápido retrolavado.

El flujo de retrolavado también es reducido. Debido a su densidad única, la antracita puede utilizarse en filtros multimedia o lecho profundo. A una densidad de 50 lbs/pie, es adecuada hidráulicamente y quedará por encima de medios más pesados como son la arena de filtrado.

**Filtros de tierras diatomáceas:** Los filtros de tierras diatomáceas o filtros de diatomitas forman una capa de medio centímetro de altura en un filtro puesto a presión o al vacío. Este filtro es muy adecuado cuando el agua presenta conteos bajos de bacterias y poca turbiedad (menor a 10 unidades nefelométricas de turbiedad), lo que representa sus principales limitantes, así como que es potencialmente difícil mantener el grosor de la capa de tierra diatomácea en el interior de los filtros (Leal, 2000).

La filtración con tierra diatomácea se utiliza para eliminar físicamente los particulados. El proceso es eficaz para la eliminación de Giardia, Criptosporidium, algas y, dependiendo el grado, algunas bacterias y virus.

Los sistemas de filtración de tierra diatomácea son fáciles de operar y son económicamente atractivos.

**Filtros empacados:** Los filtros empacados contienen todas las etapas de la filtración montadas en una unidad: adición de reactivos, floculación, sedimentación y filtración. Actualmente se utilizan con gran frecuencia para tratar agua superficial, para la remoción de turbiedad, color y organismos coliformes. Sus principales ventajas residen en el tamaño compacto de las plantas, efectividad costo/beneficio, relativa facilidad de uso y operación. Su principal desventaja se debe a que si la turbiedad del influente varía mucho con respecto al tiempo, es necesario que el operador esté atento a ello y esté lo suficientemente capacitado para responder a los cambios que se presenten en el influente (Leal, 2000).

**Filtros de cartuchos:** Los filtros de bolsa y cartucho son sistemas sencillos y fáciles de operar que usan una bolsa tejida o un cartucho con un filtro de filamento enrollado para restringir físicamente el paso de los microorganismos y sedimentos del agua fuente cuando ésta pasa a través del medio filtrante.

La principal desventaja de estos filtros es que con el uso repetido, los microorganismos pueden crecer y se hace necesario el empleo de un desinfectante,

así como la necesidad de cambiar más frecuentemente los materiales filtrantes cuando el agua tiene alto contenido de particulados.

### 3.2. Procesos de Membrana

Las membranas para el tratamiento del agua son láminas delgadas de material que permiten separar los contaminantes según sus características como el tamaño o la carga eléctrica. El agua pasa a través de una membrana, pero dependiendo de su tamaño, las partículas, los microorganismos y otros contaminantes quedan retenidos y por lo tanto son separados.

Los procesos de membranas requieren de una presión inducida o de vacío para separar las partículas según su tamaño. Entre las principales tecnologías de membranas se tienen:

**Microfiltración (MF):** La separación por membrana micrométrica contiene poros de aproximadamente 0.03 a 10  $\mu\text{m}$ , retiene pesos moleculares mayores a 100.000 daltons y usa presiones de influente relativamente bajas, entre 100 a 400 kPa. Generalmente es capaz de remover material particulado como arena, arcilla, Giardia, Cryptosporidium, algas y algunas especies bacterianas. No retiene virus pero tiene cierta capacidad de remoción de compuestos orgánicos lo que reduce el potencial de descomposición de la membrana, problema común con esta tecnología (Leal, 2000).

Actualmente, las membranas de microfiltración se fabrican con diferentes diseños, entre los que destacan: las membranas enrolladas en espiral, las cuales están compuestas con varias láminas de membrana plana alrededor de una tubería central que suministra el agua que recibirá el tratamiento, las configuraciones de fibra fina hueca que utilizan un grupo de miles de tubos huecos que están contruidos con material de la membrana y los microfiltros, como los ultrafiltros que usualmente se encuentran en una configuración de fibra hueca.

El lavado de la membrana se realiza en sentido contrario al flujo de uso, haciendo pasar agua o aire a presión a través de la membrana para remover los sólidos acumulados en la superficie de la membrana misma. En comparación con otras clases de tecnologías de membranas, la microfiltración es la menos utilizada hoy en día.

**Ultrafiltración (UF):** La ultra filtración se realiza por medio de membrana de tamaño de poro aproximado entre 0,002 y 0,1  $\mu\text{m}$  y ejercicio de presión para que el agua atraviese la membrana. Con este tamaño de poro pueden retenerse moléculas con pesos moleculares mayores a 10.000 daltons y se opera a presiones que oscilan entre 200 y 700 kPa. La ultra filtración impide el paso de bacterias y la mayoría de los virus, pero es permeable a algunos tipos de estos últimos y de materia disuelta, como sustancias húmicas. Se recomienda la desinfección con cloro después de la ultra filtración (Leal, 2000).

La mayor parte del material coloidal, especies de alto peso molecular, material particulado, especies orgánicas e inorgánicas son retenidos en estas membranas. De las especies biológicas se retienen protozoarios, bacterias y la mayoría de los virus conocidos. En cuanto a especies metálicas como quelatos de hierro y manganeso requieren un proceso previo de separación para evitar la descomposición de la membrana.

**Nanofiltración (NF):** Las membranas de nanofiltración poseen un tamaño de poro aún menor a las anteriores, de 0,001  $\mu\text{m}$ . En ellas se retienen moléculas de peso molecular mayor a 1.000 daltons. Las presiones a las que deben trabajar estas membranas son sensiblemente mayores que las anteriores y usualmente pueden estar entre 600 kPa y 1.000 kPa. Pueden remover virtualmente todo tipo de bacterias, virus, quistes y material disuelto húmico. Dado el bajo contenido de materia orgánica presente después de la nanofiltración, no se generan subproductos de la cloración, si se añade esta sustancia para impartirle un efecto desinfectante residual al agua (Leal, 2000).

La nanofiltración se usa para eliminar la dureza, las materias naturales orgánicas, y los productos orgánicos sintéticos del agua y dado que se remueve una gran cantidad de sustancias disueltas en el agua, incluso alcalinidad (carbonatos y bicarbonatos). El agua una vez tratada por este proceso, adquiere características corrosivas, por lo que generalmente se requiere la adición de algún álcali para reducir este problema.

El agua influente deberá tratarse siempre antes de la nanofiltración, para que las partículas no contaminen la membrana y limiten su eficiencia. Las aguas con alto contenido de hierro, cloro y manganeso quizá requieran tratamiento previo. Incluso en condiciones ideales, los sistemas de nanofiltración, al igual que los



sistemas de ósmosis inversa, requieren de limpieza regular y el reemplazo periódico.

**Ósmosis Inversa (OI):** Este proceso, también conocido como hiperfiltración, se basa en el uso de una membrana semipermeable que permite el paso de agua, mas no de iones disueltos. La membrana tiene poros menores a  $10 \text{ \AA}$  (1 nm). El agua es sujeta a una alta presión que la obliga a pasar a través de la membrana; todas las sales disueltas permanecen en una solución que se concentra de sales, motivo por el cual se le conoce como salmuera o agua de rechazo.

La proporción de volumen entre el agua de rechazo y el agua producida representa la eficiencia del sistema. Si bien la ósmosis inversa puede remover prácticamente cualquier contaminante orgánico o inorgánico del agua, tiene como desventaja los altos costos de capital y de operación necesarios. El manejo del agua de rechazo puede convertirse en un problema pues los contaminantes se concentran en ésta, los pretratamientos son indispensables, las membranas tienen la tendencia a descomponerse y el agua de rechazo puede llegar a ser 25 a 50% del caudal de alimentación, lo que significa un gran desperdicio de agua (Leal, 2000).

Es un proceso de presión inducida por el que una membrana semi-permeable rechaza constituyentes disueltos presente en el agua de alimentación. Este rechazo se debe a la exclusión de tamaño, carga de exclusión e interacciones físico-químicas entre el soluto, disolvente y membrana. La eficiencia del proceso depende de los parámetros operacionales sobre la membrana y de las propiedades del agua. La mayoría de los módulos disponibles comercialmente son en espiral y de fibra hueca. Este último tiene una muy alta densidad de empaquetamiento y por lo tanto una alta tasa de producción de permeado, por lo que es más propenso al ensuciamiento (Malaeb et al., 2011).

### **3.3. Sistemas de adsorción y de Intercambio Iónico**

Los sistemas de adsorción tratan el agua mediante la adición de una sustancia, como carbón activado o alúmina (óxido de aluminio), a la fuente de suministro de agua. Los adsorbentes atraen a los contaminantes mediante procesos químicos y físicos que causan que éstos se “adhieran” a sus superficies para su eliminación posterior.

Por otro lado el intercambio iónico utiliza materiales sintéticos o naturales (Zeolita), para eliminar contaminantes inorgánicos cargados eléctricamente. El intercambio iónico se usa con mayor frecuencia para eliminar la dureza (resina catiónica) o nitratos (resina aniónica). En ambas instancias, se puede regenerar con agua salada.

Entre las tecnologías más socorridas de adsorción y de intercambio iónico se encuentran las siguientes:

**Carbón Activado en polvo:** El adsorbente de uso más frecuente es el carbón activado, una sustancia que es muy similar al carbón común. Sin embargo, el carbón activado, se trata mediante calor y oxidación para que se vuelva sumamente poroso y capaz de adsorber o capturar fácilmente las impurezas en el agua.

El carbón activado atrae no solamente contaminantes conocidos sino además atrae materia orgánica disuelta (muchas de la cual es inocua). Por lo tanto, es necesario el monitoreo para asegurar que las dosis de carbón sean lo suficientemente elevadas para adsorber todos los contaminantes.

Existen dos formas diferentes de carbón activado en uso común, carbón activado granular (CAG) y carbón en polvo activado (CAP). Físicamente, las dos formas difieren como lo sugiere su nombre, según el tamaño y el diámetro de la partícula.

El carbón en polvo activado es una opción de tratamiento económica, que típicamente se puede agregar a la infraestructura de un sistema de tratamiento existente. Esta flexibilidad convierte al CAP en una opción atractiva de respuesta de tratamiento de corto plazo a condiciones deficientes del agua. Es particularmente útil para el tratamiento de deficiencias de sabor y de color.

**Carbón activado granular:** El carbón granular activado (CAG) consiste en partículas de aproximadamente un milímetro de diámetro, de diez a cien veces el tamaño de las partículas de carbón en polvo. Éste se distribuye típicamente en un lecho o columna a través de los cuales se hace pasar o percolar lentamente el agua fuente. Algunas veces se unen entre sí varias columnas de adsorción en un solo sistema.

Al igual que el carbón en polvo activado, el carbón granular activado atrae no solamente contaminantes conocidos, sino además atrae materia orgánica disuelta naturalmente y en su mayoría inocua. Por lo tanto, es necesario el monitoreo constante, para asegurar que exista el suficiente carbón y que continúe activo para adsorber todos los contaminantes. Los particulados pueden además obstruir los sistemas y afectar su eficacia. Los sistemas CAG tienen un mayor costo de capital pero son capaces de lograr niveles más elevados de eliminación, y sus costos de operación (principalmente el costo de reemplazar el CAG agotado) son menores si el proceso de eliminación se realiza de manera continua.

Estos sistemas pueden servir además como filtros biológicos de agua sin afectar la eficacia si se permite el crecimiento de microorganismos beneficiosos en el sistema.

**Resinas sintéticas de intercambio iónico:** Los átomos o moléculas cargados eléctricamente se conocen como iones. El proceso de tratamiento por intercambio iónico utiliza resinas especiales para eliminar contaminantes inorgánicos cargados eléctricamente como arsénico, cromo, nitrato, calcio, radio, uranio, y exceso de fluoruro del agua.

Cuando el agua fuente se hace pasar a través de una serie de cordones de resina, donde intercambia sus contaminantes cargados eléctricamente por los iones inocuos cargados y depositados en la superficie de la resina. Las resinas de intercambio iónico almacenan entonces los contaminantes que hayan atraído. Debido a este proceso de acumulación, es necesario limpiar periódicamente las resinas con una solución que recargue su contenido de iones inocuos intercambiables.

La resina de intercambio iónico se comercializa en dos presentaciones: resinas catiónicas, las cuales intercambian cationes como calcio, magnesio y radio, resinas aniónicas, utilizadas para eliminar aniones como nitratos, arsenatos, arsenitos o cromatos. Usualmente, ambos se regeneran con una solución salina (cloruro de sodio). En el caso de las resinas catiónicas, el ión de sodio desplaza el catión del sitio de intercambio; y en el caso de las resinas aniónicas, el ión de cloruro desplaza el anión del sitio de intercambio. Como norma, las resinas catiónicas son más resistentes a la contaminación que las resinas aniónicas. Se pueden diseñar las resinas para tener preferencia por iones específicos, de manera que el proceso se pueda adaptar fácilmente a una amplia gama de contaminantes diferentes.

Este proceso de tratamiento funciona mejor en agua con partículas libres, porque la materia particulada se puede acumular en la resina y limitar su eficacia. El intercambio iónico es un sistema común de tratamiento de agua que se puede adaptar a cualquier tamaño de instalación de tratamiento. Además, se puede adaptar para dar tratamiento al agua en el punto de uso y en el punto de admisión.

**Intercambio iónico con Zeolitas:** Las Zeolitas del tipo clinoptilolita, permite llevar a cabo tratamientos de aguas residuales en forma mucho más eficiente y económica que otros materiales conocidos para estos efectos (Halbinger et al., 2002).

El intercambio iónico empleando minerales porosos naturales, como las zeolitas, permite la separación de cationes metálicos en solución que se difunden a través de intersticios del material, ocupando el sitio de iones fácilmente permutables hacia la solución, como el  $\text{Na}^{1+}$  y el  $\text{K}^{1+}$ , entre otros (Barrer, 1978). Las zeolitas deben sus propiedades de intercambio a la carga en exceso que se genera por la sustitución del  $\text{Al}^{+3}$  con  $\text{Si}^{+4}$  en el tetraedro básico de su estructura. En particular, la zeolita con alto contenido de clinoptilolita tiene capacidad de remoción selectiva de metales, aún en bajas concentraciones (Vaca et al., 1996).

### 3.4. Desinfección química y oxidantes

Los sistemas de desinfección se usan para combatir enfermedades propagadas en agua y causadas por bacterias o virus. Esos procesos neutralizan los patógenos mediante el tratamiento del agua de fuentes con aditivos químicos, o mediante la exposición a la luz ultravioleta. Estos sistemas de tratamiento a menudo son de bajo costo y pueden fácilmente reducir su capacidad para las instalaciones de tratamiento de bajo volumen.

La desinfección mata o inactiva organismos causantes de enfermedades, mas la efectividad de la desinfección se juzga por la capacidad de controlar a los organismos indicadores que son las bacterias coliformes totales y fecales. Estos organismos son inocuos al ser humano, pero su presencia indica que organismos patógenos pueden estar presentes o haber sobrevivido la desinfección.

Como sustancias viables para la desinfección existen el cloro (por medio de cloro gas, hipoclorito de sodio o hipoclorito de calcio), cloraminas y ozono; también se usa la irradiación con luz ultravioleta de baja longitud de onda (EPA, 1990).

**Cloro:** La cloración se efectúa con cloro gas o una sustancia que libere este gas, una vez que se encuentra en el agua. En el primer caso el cloro gas a presión normal es un gas verde-amarillento y sumamente tóxico. Es muy efectivo para remover casi todos los patógenos microbianos y apropiado para desinfección en plantas de tratamiento, tanto como para la desinfección secundaria, en la red de distribución. El cloro gas se distribuye en forma de líquido a presión en tanques y es inyectado en el agua a través de un orificio de Venturi, para que el cloro pase rápidamente al agua y se mezcle. Se requiere un tiempo de contacto entre el cloro y el agua para asegurar la desinfección y controlar al mismo tiempo el pH del agua. El manejo del cloro gas es complicado y merece mucha atención y medidas de seguridad adicionales, como equipos autónomos de respiración que deben estar disponibles en la cercanía de la instalación (Leal, 2000).

El cloro es una opción de tratamiento de bajo costo que se utiliza para mejorar el sabor y la claridad del agua a la vez que se eliminan muchos microorganismos como bacterias y virus. Sin embargo, el proceso tiene sus limitaciones. Giardia y Criptosporidium son usualmente resistentes al cloro a menos que éste se use en dosis más elevadas que aquéllas preferidas usualmente para el tratamiento. La presencia de estos parásitos puede requerir el tratamiento previo del agua fuente.

**Cloramina:** La cloramina se forma cuando se añade cloro al agua que contiene amoníaco o cuando se añade amoníaco a agua que contiene cloro. Esta sustancia es un bactericida efectivo y genera menos subproductos que el uso de cloro. Sus principales limitaciones se basan en que tiene un poder desinfectante menor que el del cloro y de que dentro de las reacciones posteriores puede generarse tricloruro de nitrógeno que tiene sabor y olor desagradables. Es apropiado para prevenir el recrecimiento en el sistema de distribución, propiamente dicho. Por lo general, se aplica cloro gas en el sistema, seguido de amoníaco gas o hidróxido de amonio, tras un mezclado adecuado y tiempo de contacto suficiente, la desinfección es efectiva (Leal, 2000).

**Ozono:** El ozono es una forma alótropa del oxígeno que tiene tres átomos en cada molécula, en lugar de la forma usual de dos átomos. Es un oxidante poderoso y

agente desinfectante. Se forma a partir del oxígeno del aire, que pasa a través de un sistema de electrodos de alto voltaje.

Las ventajas principales del ozono se deben a que requiere de tiempos de contacto y dosis menores que el cloro, por lo que ha sustituido al cloro en plantas altamente tecnificadas. Por regla general, el ozono no produce subproductos halogenados, a menos que el agua contenga bromuros.

Debido a la inestabilidad de la molécula de ozono, el gas debe ser generado *in situ* y ser utilizado de inmediato. Los voltajes elevados que se manejan en los equipos los hacen técnicamente complejos en su mantenimiento y operación y caros en su costo de operación. Adicionalmente, tiene la desventaja de que el ozono no mantiene un poder desinfectante residual en el agua, una vez terminada la aplicación (Leal, 2000).

**Radiación UV:** La radiación ultravioleta se genera con una lámpara especial. Cuando la radiación penetra la pared celular de un organismo, el material genético es modificado y la célula es incapaz de reproducirse.

La luz ultravioleta destruye virus y bacterias, sin embargo, como en el caso del ozono, es necesario del uso posterior de cloro, para prevenir el recrecimiento de bacterias. La luz ultravioleta provee un método de operación y mantenimiento sencillo, es útil con tiempos cortos de contacto y no genera residuos tóxicos o subproductos.

Entre sus principales limitaciones se encuentran su incapacidad de inactivar protozoarios, y su ineficiencia para tratar aguas turbias con sólidos suspendidos, color o materia orgánica soluble. En estos casos la radiación será absorbida por estas sustancias y la desinfección se verá seriamente limitada. La efectividad de la radiación ultravioleta con vías a desinfectar agua depende de la dosis absorbida por los organismos, en función de la intensidad de la lámpara utilizada y el tiempo de exposición. Si la dosis no es suficiente, el material genético puede verse dañado pero no destruido, lo que permitirá el recrecimiento bacteriano una vez que cese el tratamiento (EPA, 1990).

#### **4. Propuesta del tren de tratamiento para la Potabilización del agua proveniente del Acuífero del Valle del Mezquital**

El primer paso para potabilizar agua es determinar la calidad inicial del agua en la fuente de abastecimiento, lo que permitirá diseñar el tratamiento necesario. Es posible que el agua contenga metales, materia orgánica disuelta o particulada, color, sabor y olor desagradables, bacterias, virus, parásitos y otros microorganismos, grandes cantidades de calcio y magnesio, hierro y manganeso, carbonatos, bicarbonatos, cloruros o sulfatos en exceso, sustancias orgánicas de toxicidad elevada, etc. (American Water Works Association et al., 1998).

Por otro lado, el agua proveniente del acuífero del Valle del Mezquital no solo contiene un gran cantidad de contaminantes, sino que además rebasa los límites máximos permisibles por las Normas, tanto nacional como internacional, por lo que deben tomarse en cuenta dichos límites de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

##### **4.1. Límites máximos permisibles de calidad de agua para consumo Humano**

En el Anexo A se resumen los límites máximos permisibles de las normatividades con más renombre y que además rigen actualmente los estándares, tanto nacional como internacional de calidad del agua para consumo humano.

##### **4.2. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco**

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco (PTAR Atotonilco), se ubica dentro del Municipio de Atotonilco de Tula entre las localidades de San José Acoculco y Melchor Ocampo (El Salto), municipio de Tepeji del Río, en el estado de Hidalgo, entre los paralelos 19° 58'12" y 19° 57'11" de latitud norte y los meridianos 99°17'06" y 99°18'17" de longitud oeste, así mismo, se encuentra a pocos metros del Portal de salida del Emisor Central y del sitio donde está proyectada la llegada del Túnel Emisor Oriente.

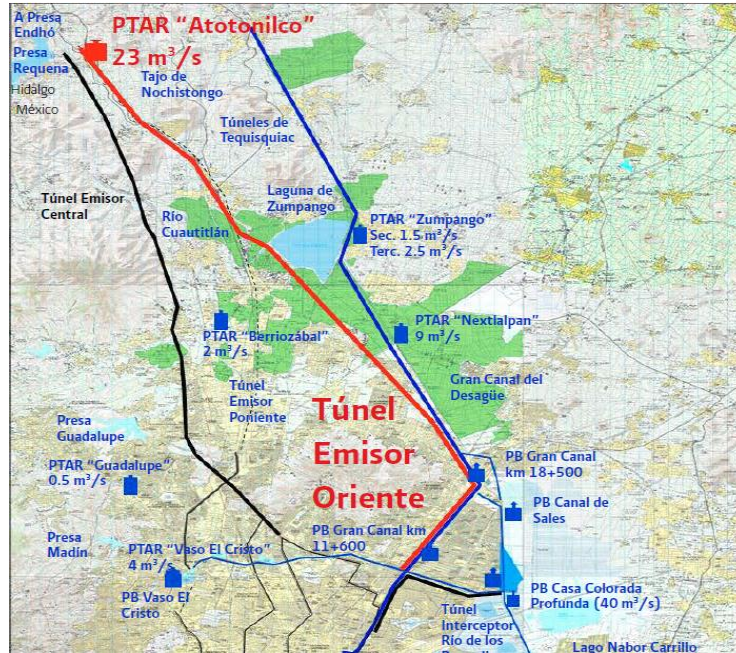


Figura 16. Ubicación de la PTAR Atotonilco.

El predio tiene una superficie total disponible de 158.514250 ha, la configuración superficial es propia de la ladera de un cerro con un desnivel de más de 60 m entre la cota más baja y la más alta y lo cruzan el canal de aguas para riego El Salto-Tlamaco y la línea del Ferrocarril México-Querétaro.

Con la PTAR Atotonilco se tratará el 60% de las aguas residuales del Valle de México, lo cual permitirá sanear los cuerpos y cauces superficiales que reciben aguas residuales. Así mismo, se incrementará el potencial agrícola en 80 mil hectáreas en el Valle de Tula mediante el riego con aguas residuales tratadas las cuales cumplirán con la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 2012).

La planta tendrá una capacidad nominal de tratamiento de 23 metros cúbicos por segundo, con una capacidad hidráulica adicional de 12 metros cúbicos por segundo para manejar el agua pluvial que se mezcla con el agua residual en la época de lluvias. La PTAR contará con dos trenes de tratamiento (Figura 15), un tren de tratamiento biológico denominado tren de proceso convencional TPC con una capacidad nominal de 23 metros cúbicos por segundo y un tren de tratamiento químico denominado tren de proceso químico TPQ, cuya capacidad nominal de tratamiento será de 12 metros cúbicos por segundo; dichos procesos en su conjunto contarán con una capacidad nominal de tratamiento de 35 metros cúbicos por segundo, con una capacidad de gasto medio de 42 metros cúbicos por segundo en



los meses de lluvia. La desinfección de las aguas residuales en la PTAR se hará mediante el uso de gas Cloro.

A continuación se presenta el Diagrama de Flujo del Proceso de la PTAR.

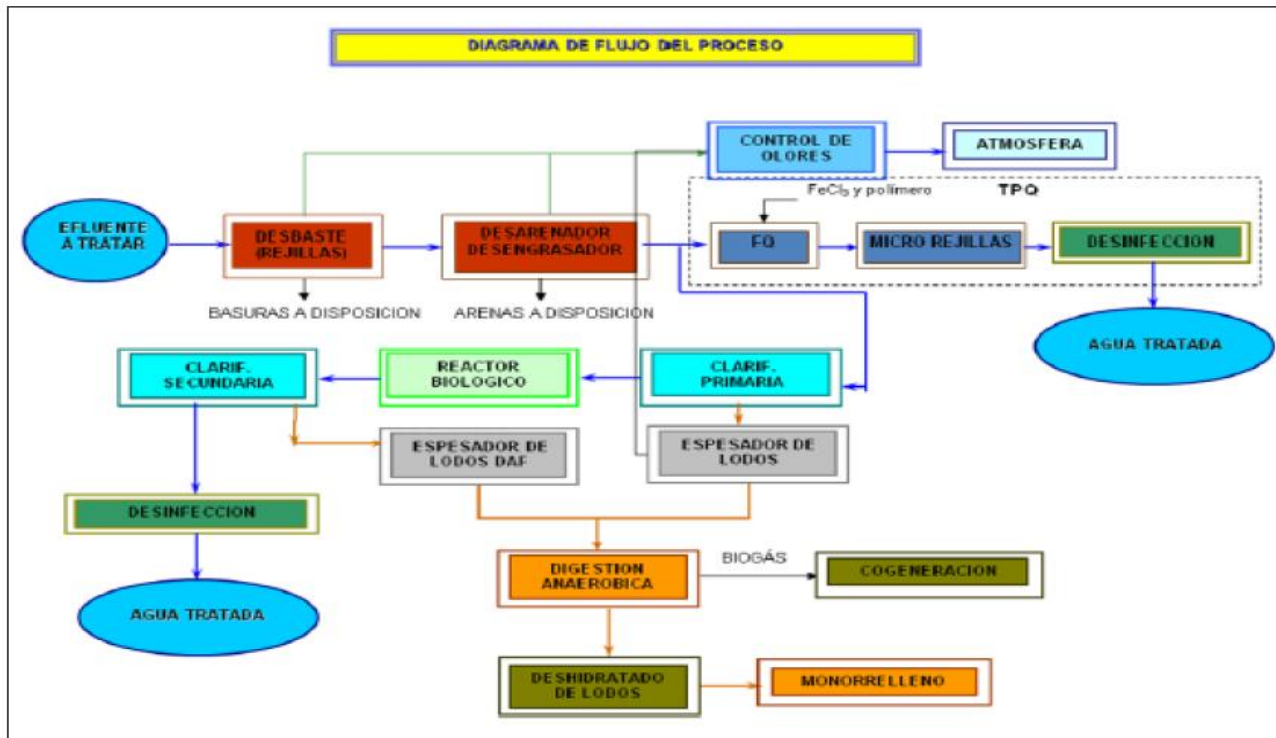


Figura 17. Tren de tratamiento de la PTAR Atotonilco. Tomado de MIA SEMARNAT.

El tren de tratamiento consiste básicamente en lo siguiente:

#### Tren de Proceso Convencional (TPC) de 23 m<sup>3</sup>/s

- Rejillas
- Desarenador/Desengrasador
- Clarificador Primario
- Reactor Biológico
- Clarificador Secundario
- Desinfección

#### Tren de Proceso Químico (TPQ) de 12 m<sup>3</sup>/s

- Proceso físico-químico (Mezcla floculación con cloruro férrico).
- Decantación lamelar.

- Filtración mediante filtros de malla rotativos.
- Desinfección mediante cloro gas.
- Bombeo de agua al canal Salto de Tlamaco.

Por otra parte se tiene además el tren de tratamiento de lodos el cual está conformado de la siguiente manera:

#### **Tren de Tratamiento de Lodos**

- Mezcla y homogenización (Lodos primarios, secundarios y químicos).
- Espesamiento de lodos.
- Digestión anaerobia mesofílica (35°C).
- Cogeneración de Energía eléctrica (60% de la energía requerida por la PTAR).
- Deshidratado de lodos.
- Disposición final en Monorrelleno dentro de la planta y posible reúso agrícola.

Con este tratamiento se aprovechará el contenido energético de los lodos y se convertirá el gas metano en energía eléctrica. Con el aprovechamiento del metano se pretende que la planta tratadora sea autosuficiente en sus necesidades de electricidad ya que producirá energía de aproximadamente el 60% de la energía requerida por la misma.

En cuanto al tratamiento del agua residual, el agua efluente de la planta alcanzará los límites máximos permisibles para descarga a cuerpos de agua establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996. Adicionalmente, el agua seguirá siendo utilizada para riego agrícola de los Distritos de Riego 003 y 100, abarcando un área de riego de aproximadamente 80,000 Ha.

A continuación se presenta la tabla en la cual se resume la calidad esperada del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Atotonilco.

Tabla 9. Calidad esperada del efluente de la PTAR Atotonilco. Tomado de MIA SEMARNAT.

Parámetro	Influente	Efluente TPC	Efluente combinado		Unidades
			Q = 32 m <sup>3</sup> /s	Q = 35 m <sup>3</sup> /s	
Sólidos suspendidos	313	31	49	53	mg/l
% de sólidos volátiles	61	71	68	67	%
DBO	229	23	58	66	mg/l
DBO soluble	115	12	41	47	mg/l
DQO	570	26	99	115	mg/l
DQO soluble	285	5	84	101	mg/l
Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)	28	12	14	15	mgN/l
NTK soluble	20	10	13	14	mgN/l
Amoníaco	20	10	13	14	mgN/l
Fósforo total	11	8	7	7	mgP/l
pH	7.6	7.6	8.6	8.6	
Sólidos sedimentables	10	0	0	0	ml/l
Grasas y aceites	15	0	0	0	ml/l

Así mismo, el agua tratada tendrá dos destinos: el Canal Salto Tlamaco para riego agrícola y el Río El Salto de cuyo cauce se derivan algunos canales de riego, en particular el Canal Viejo Requena, que descarga sus gastos excedentes en la presa Endhó. Con el procesamiento de las aguas sucias se beneficiará a más 700 mil personas del Valle del Mezquital, de las cuales más de 300 mil habitan en zonas de riego.

Con esta magna obra, se pretende sanear las corrientes del Río El Salto y el Canal El Salto Tlamaco, las cuales han sido reutilizadas para riego y se han infiltrado por más de 100 años sin tratamiento alguno al Acuífero del Valle del Mezquital, por lo que cuando entre en funcionamiento esta PTAR, se espera que el agua de dicho Acuífero mejore su calidad en aproximadamente 25 años de infiltración del agua residual tratada.

### 4.3. Propuesta del tren de tratamiento

Con base en los estudios previos sobre la calidad del agua del Valle del Mezquital, se obtuvo una tabla (ver Tabla 10) en la cual se resumen los contaminantes que rebasaron las Normas y que se tomarán en cuenta para proponer el tren de tratamiento para potabilizar el agua de dicho Acuífero.

Tabla 10. Resumen de los principales parámetros que rebasan la Norma

Tipo	Parámetros que sobrepasan la NOM
<b>Fisicoquímicos</b>	Bicarbonatos, Carbonatos, Color, Conductividad, Cloruros, COT, Dureza Total, Nitratos, SAAM, Sulfatos, SDT, Turbiedad.
<b>Biológicos</b>	Coliformes Totales, Coliformes Fecales, Salmonella ssp, Bacteriófagos y Giardia ssp.
<b>Químicos</b>	Mercurio, Plomo, Sodio, Boro, Fierro, Cadmio, Manganeseo, Magnesio, Potasio,
<b>Contaminantes Emergentes</b>	Triclosán, Ormetopim, Anfetamina, Ibuprofeno, 2,4 D, Ketoprofeno, Acido Salicílico, Diclofenaco, Gemfibrozil, Acido Clofibrico, Nonil Fenoles, Butil Bencil Ftalato, Carbamazepina, Esteron, Estradiol, Pentaclorofenol, Naproxeno, etc.

Tomando como referencia estos contaminantes y el análisis de las diferentes tecnologías de potabilización, se propone el siguiente tren de tratamiento para alcanzar la calidad potable del agua del Acuífero del Valle de Tula.

## Tren de tratamiento

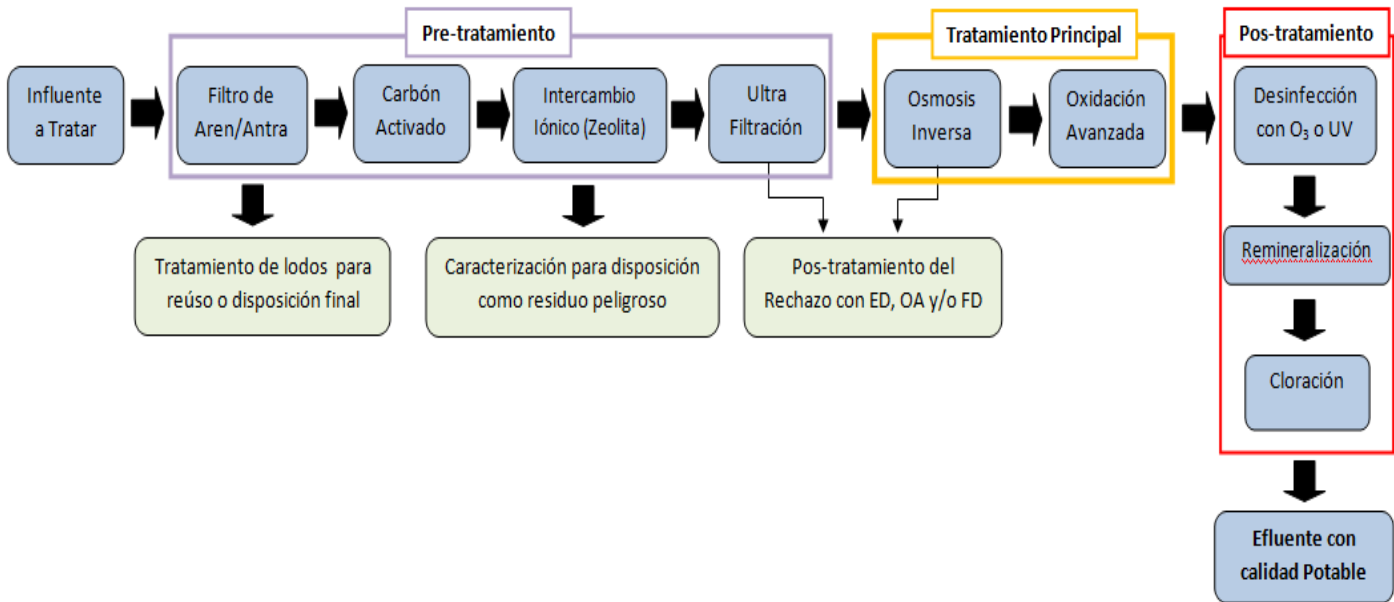


Figura 18. Tren de tratamiento propuesto para la potabilización del agua del Acuífero del Valle del Mezquital.

El tren de tratamiento propuesto consta de una fase de Pretratamiento, Tratamiento Principal y Postratamiento, así como una propuesta de tratamiento de los subproductos que se generen de dicho proceso de barreras múltiples. Cabe destacar que se deben realizar las pruebas necesarias para evaluar la eficiencia de remoción, así como un estudio de evaluación del riesgo microbiológico y químico del agua residual tratada mediante este y otros procesos a fin de corroborar su viabilidad.

A continuación se presenta una justificación de cada una de las tecnologías propuestas para el tren de tratamiento.

### **Pretratamiento**

- **Filtro de Arena/Antracita:** En esta etapa del tren de tratamiento, se llevarán a cabo procesos biológicos, ya que los filtros forman una película delgada de microorganismos quienes atrapan y destruyen algas, bacterias y materia orgánica, además de que sus ventajas residen en que son de bajo costo, confiables, pueden remover algunos microorganismos hasta en 99,9% y la operación y control del proceso son muy sencillas.
- **Columna de Carbón Activado:** Con este proceso se removerán principalmente olores, sabores, color, así como algunos compuestos orgánicos volátiles e incluso plaguicidas ya que el carbón activado tiene una gran área superficial y por lo tanto alta capacidad de adsorción de compuestos, que quedarán adheridos a la superficie del mismo.
- **Intercambio Iónico con Zeolita de tipo Clinoptilolita:** En particular, la zeolita con alto contenido de clinoptilolita se utilizará para la remoción selectiva de metales como el hierro y el manganeso que podrían afectar el siguiente proceso que es la ultrafiltración.
- **Ultrafiltración:** Este proceso tiene como finalidad eliminar el resto de las bacterias y la mayoría de los virus, así como la mayor parte del material coloidal, especies de alto peso molecular, material particulado, especies orgánicas e inorgánicas, además de que es un excelente pretratamiento para evitar la colmatación de las membranas de Osmosis Inversa.

## Tratamiento Principal

- **Osmosis Inversa:** En esta etapa del tren de tratamiento se removerán la mayoría de las sustancias disueltas incluida la alcalinidad (Carbonatos y Bicarbonatos) y una cantidad importante de los contaminantes emergentes, por lo que con el fin de alcanzar una mejor calidad en el permeado, se propone un arreglo de Osmosis Inversa en dos etapas.
- **Oxidación Avanzada:** La Oxidación Avanzada se encargará de la mineralización de los compuestos orgánicos que pasen a través de la osmosis inversa, ya que se ha demostrado que las membranas de Osmosis Inversa remueven aproximadamente el 85% de los contaminantes emergentes, por lo tanto, con el fin de remover la mayor cantidad de contaminantes emergentes se utiliza esta operación unitaria.

## Postratamiento del Permeado

- **Desinfección con Ozono:** Se utilizará como oxidante con el fin de mineralizar cualquier remanente que pudiera quedar después del proceso principal.
- **Remineralización:** Este proceso le devolverá las sales necesarias al agua, ya que después de haber pasado por las membranas de Osmosis Inversa el agua tendera a acidificarse al perder los carbonatos y bicarbonatos, por lo que será necesario restablecer el equilibrio en el agua con una probable adición de gas carbónico.
- **Cloración:** La cloración será necesaria para mantener el cloro residual a la hora de llevar el agua a almacenamiento o a la red de distribución.

## Postratamiento del Rechazo

- **Oxidación Avanzada:** Se propone un tratamiento con Oxidación Avanzada, sin embargo, es necesario realizar estudios para sugerir incluso un tratamiento con Fotodegradación, Electrodiálisis y Oxidación Avanzada ya que estos procesos ayudarán a la mineralización de los compuestos orgánicos presentes en el rechazo, el cual alcanza volúmenes de hasta el 40% del influente que entra al proceso de Osmosis Inversa.

Con base en el tren de procesos establecido para la planta piloto potabilizadora, se recomienda realizar una caracterización de los diferentes residuos y corrientes que resulten del pretratamiento, tratamiento principal (Osmosis Inversa) y postratamiento, con el fin de llevar a cabo una correcta disposición final y/o reúso de cada uno de los subproductos generados por el proceso de barreras múltiples propuesto en este trabajo.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

Para poder utilizar el acuífero del valle del Mezquital como fuente de abastecimiento para el Valle de México es necesario aplicar un tratamiento avanzado, sin embargo, se recomienda probar a nivel piloto el tren propuesto en este trabajo con la finalidad de evaluar no sólo la eficiencia de remoción de contaminantes, sino también llevar a cabo una evaluación técnica/económica del mismo.

Los indicadores de contaminación más preocupantes son los metales pesados y los contaminantes emergentes ya que ameritan una intervención especial con tratamientos avanzados, sin embargo, se concluye que se puede alcanzar la calidad potable, pero sin dejar atrás la realización de mas estudios, sobre todo en lo referente a los contaminantes emergentes, ya que aun no existe normatividad para su regulación, así como tampoco los impactos a la salud y al medio ambiente que estos puedan generar.

Por otra parte, la entrada en funcionamiento la PTAR Atotonilco mejorará significativamente la calidad del agua del acuífero, sin embargo, se debe tener en cuenta que aunque la planta podría iniciar operaciones este año, será necesario cuando menos un tiempo aproximado de 25 años para notar la mejora en la calidad del agua subterránea, por lo que para potabilizar esta agua, aun es necesario aplicarle un tratamiento avanzado como el propuesto en este trabajo.

Adicionalmente, para que los acuíferos del valle del Mezquital no sufran daños adversos es necesario protegerlos para minimizar el riesgo de contaminación por lo que se propone no solo el tratamiento del agua residual, sino también la reducción en el empleo de plaguicidas, así como la concientización de la sociedad en cuanto el uso desmedido de hormonas, medicamentos, artículos de cuidado personal, etc., ya que estos son los responsables de la generación de la gran mayoría de los contaminantes emergentes.

El tren de tratamiento que ha sido sugerido incluye procesos de filtración a través de diferentes medios, sin embargo, se debe tomar en cuenta que en todo proceso de filtración con membranas se producen al menos dos efluentes: el permeado y el rechazo. Este último constituye un nuevo reto al contar con altas concentraciones de salinidad, dureza, sulfatos, metales y contaminantes emergentes mucho



mayores que el influente de alimentación a las membranas y que adicionalmente representa hasta el 40% del total del agua que ingresa al proceso, por lo que se recomienda realizar un estudio para darle un adecuado tratamiento ya que los efluentes de rechazo de los procesos de potabilización (pretratamiento, tratamiento principal y postratamiento) sigue siendo un tema poco documentado. Aunado a esto, no se cuenta con normatividad específica para el tratamiento y disposición final de dichos efluentes, sobre todo porque los contaminantes retenidos suelen ser muy variados, como ya se mencionó, y aún no se han definido por completo los daños ocasionados a la salud y al medio ambiente de cada uno de ellos.

En cuanto a los subproductos de la potabilización, se recomienda:

- ✓ Definir estrategias de manejo, tratamiento y disposición final en base a la calidad de los subproductos y de los rechazos que se generen en cada una de las barreras del proceso de la planta piloto de potabilización (pretratamiento, tratamiento principal y postratamiento) de una fuente no convencional.
- ✓ Evaluar la confiabilidad de cada una de las estrategias para garantizar la reducción del nivel de riesgo e impacto ambiental, así como su factibilidad económica y social, así como establecer nuevos criterios para reúso o tratamiento del sistema de rechazo de la planta piloto potabilizadora.
- ✓ Contar con diversas estrategias para el tratamiento y disposición final de los residuos generados por el proceso a fin de que cumplan con la normatividad vigente, en caso de que exista.
- ✓ Determinar la confiabilidad de los procesos de tratamiento de los subproductos y del rechazo mediante la reducción de microorganismos, materia orgánica así como de contaminantes emergentes.
- ✓ Elaborar lineamientos de manejo, reúso, tratamiento y disposición final de los subproductos y efluentes de rechazo para definir su posible regulación.

## Bibliografía

- Abedrop, L., Espinosa, V., Collado, J., Morales, J. y Hernández, J. 2012. El gran reto del agua en la ciudad de México. Pasado, presente y perspectivas de solución para una de las ciudades más complejas del mundo. Sistema de aguas de la Ciudad de México.
- American Water Works Association y American Society of Civil Engineers 1998. Water Treatment Plant Design, McGraw-Hill, Nueva York, E.U.A.
- Breña, P. y Breña, N. 2009. Problemática del recurso agua en grandes ciudades: zona metropolitana del valle de México. ContactoS 74, 10 - 18.
- Carmona, P., López, G. y Farell, B. 2014. El Valle del Mezquital como Parte de un Ciclo Hidrológico Inducido en Busca de la Sustentabilidad Hídrica de la ZMVM. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. Jalisco, México.
- Carmona, P. y Muñiz, A. 2014. Contaminación Emergente del Valle del Mezquital. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. Jalisco, México.
- Carmona, P., Ramos, T. y Sánchez, H. 2014. Nuevas Fuentes de Abastecimiento para la Zona Metropolitana del Valle de México. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. Jalisco, México.
- Centro del tercer mundo para el manejo del agua A.C. 2002. El Manejo del Agua en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: La Forma Difícil de Aprender.
- CONAGUA, 2007. Tabla de acuíferos, con información de Región Hidrológico-Administrativa, clave, nombre, región y subregión hidrológica, cuenca, así como sus principales características para el cálculo de disponibilidad o déficit al 31 de diciembre de 2007, México, Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA, 2012. Acciones de infraestructura de drenaje y abastecimiento de agua en el Valle de México 2007-2012, México, Comisión Nacional del Agua.
- CONAPO, 2005. Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005, México, Consejo Nacional de Población.
- Diario Oficial de la Federación (DOF), Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, Última Reforma.
- Environmental Protection Agency, 1990. Technologies for Upgrading existing or desingning new drinking water treatment facilities, EPA/625/4-89/023.
- FG y ASOCIADOS. 2009. Estudio de factibilidad técnica - económica - financiera y social del sistema de extracción - captación - conducción y entrega del agua del acueducto Valle del Mezquital - Zona Metropolitana

del Valle de México y recopilación de estudios para profundizar en la fuente de captación, el lugar y fuente de entrega, el tipo de tratamiento, efecto (de largo plazo) por consumo de agua en la población de Tula para descartar incidencia de enfermedades en la población. Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, México, D.F. 11 capítulos.

- Galindo, C. E., Otazo, S. ME., Reyes, G. R., Arellano, I. S., Gordillo, M. A. y González, R. C. 2010. Balance Hídrico en el Acuífero Cuautitlan-Pachuca, México: Proyecciones para 2021. *GeoFocus*, n° 10, p. 65-90. ISSN:1578-5157.
- Gallegos, E., Warren, A., Robles, E., Campoy, E., Calderón, A., Sainz, M.G., Bonilla, P., Escolero, O. 1999. The effects of wastewater irrigation on groundwater quality in Mexico: *Water Science and Technology*, 40(2), 45-52.
- Garza, G. 2006. Macroeconomía de la Ciudad de México, México, Urban Age Mexico City Conference.
- Halbinger, C., Ramírez, R. y Durán, A. 2002. Eliminación de amoníaco en aguas residuales clarificadas por el proceso de intercambio iónico con zeolitas. Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Guanajuato, México.
- Hernández A., Tejerina, F., Arribas, J.I., Martínez, L. y Martínez, E. 1990. Microfiltración, Ultrafiltración y Ósmosis Inversa. Serie: Procesos de transporte y separación en membranas. Vol. 4. Universidad de Murcia.
- Hernández, E. J. 2013. Modelo DRASTIC-Sg: una nueva herramienta para mejorar la gestión del Acuífero de la Ciudad de México. A.I. México.
- Huerta, L., Contreras-Valadez, R., Palacios-Mayorga, S., Miranda, J., Calva-Vásquez, G. 2000. Total elemental composition of soils contaminated with wastewater irrigation by combining IBA techniques: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 189(1-4), 158-162.
- Huizar, A. 1992. Simulación matemática del acuífero de Chalco - Amecameca, México. *Geofísica Internacional*, Vol. 32, Num. 1, pp. 57-79.
- IMTA. 2010. Análisis Técnico y Pruebas de Potabilización del agua del acuífero del Valle del Mezquital, en diversos municipios del estado de Hidalgo. CONAGUA, México.
- Instituto Nacional de Ecología. 2003. Paisajes hidrológicos y balance hídrico de la cuenca Lerma - Chapala escala 1: 250000. Dirección de manejo integral de cuencas hídricas.

- Leal, M.T. 2000. Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones. En: Solar Safe Water.
- Lesser y Asociados. 2007-2008. Estudio Hidrogeológico del acuífero Valle del Mezquital, Hidalgo. CONAGUA, México.
- Lesser y Asociados, Estudios Técnicos de Geohidrología, Calidad del Agua, Tenencia de la Tierra y Aspectos Sociales en la zona de captación para el Sistema Mezquital para el abastecimiento de agua en bloque al Valle de México e Hidalgo. CONAGUA, México, 2013, 5 capítulos.
- Lesser, C., Lesser, I., Santiago, A. y González, P. 2011. Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, V. 28, núm. 3, p. 323 – 336.
- Malaeb, L. y Ayoub, G.M. 2011. Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review. Desalination 267 (1-8).
- Marín, L.E., Steinich, B., Escolero, O., Leal, R.M., Silva, B., Gutiérrez, S. 1998. Inorganic water quality monitoring using specific conductance in Mexico: Ground Water Monitoring and Remediation, 18(1), 156-162.
- Page, D., Dillon, P., Toze, S., Bixio, D., Genthe, B., Jiménez-Cisneros, B.E., Wintgens, T. 2010. Valuing the subsurface pathogen treatment barrier in water recycling via aquifers for drinking supplies: Water Research, 44(6), 1841-1852.
- Reyes-Solís, I.E., Solís, C., Isaac-Olive, K., García, N.E., Andrade, E. 2009. Fractionation analysis of trace metals in humic substances of soils irrigated with wastewater in Central Mexico by particle induced X-ray emission: Microchemical Journal, 91(1), 129-132.
- Vaca, M., Torres, L. G., Jiménez, B., Monroy, M. M. 1996. Aplicación del tezontle al tratamiento terciario de las aguas residuales, XXI Congreso ANIAC.
- WOOLHOUSE AND SONYA, J. 2012. Contaminantes Emergentes: Aspectos químicos microbiológicos y de salud. Primera edición. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 23 pp.

## ANEXO A

A continuación se resumen los límites máximos permisibles de las normatividades con más renombre y que además rigen actualmente los estándares, tanto nacional como internacional de calidad del agua para consumo humano.

Tabla 11. Límites máximos permisibles para agua potable

Parámetro	Unidad	NOM-127-SSA1-1994 <sup>a</sup> (46 parámetros referidos)	EPA, 2012 (106 parámetros referidos)	OMS, 2011 (97 parámetros referidos)	UE 1998	
Microbiológicos	Organismos coliformes totales	NMP/100 mL	Ausencia o no detectable	5%	N.E.	0
	Organismos coliformes fecales, E. Coli u organismos termotolerantes	NMP/100 mL	Ausencia o no detectable	No detectable	N.E.	0
	<i>Legionella</i>	NMP/100 mL	N.E.	Se reporta 0 NMP/100mL como la meta de nivel máximo de contaminación	N.E.	N.E.
	<i>Giardia lamblia</i>	quistes	N.E.	Se requiere el 99.9% de eliminación en el proceso de filtración	N.E.	N.E.
	<i>Cryptosporidium</i>	Ooquistes	N.E.	Se requiere el 99% de eliminación en el proceso de filtración	N.E.	N.E.
	HPC	UFC/ mL	N.E.	500	N.E.	N.E.
	Virus entéricos	UFC/100 mL	N.E.	Se requiere el 99.9% de	N.E.	N.E.

Propuesta del tren de tratamiento para la potabilización del agua del Acuífero del Valle del Mezquital como fuente alternativa de abastecimiento para el Valle de México

				eliminación en el proceso de filtración		
Organolépticos	Color	Color verdadero en la escala de Pt-Co	20	15	15	Agradable
	Olor y sabor	-	Agradable	3 (umbral del olor)	Agradable	Agradable
Fertilizantes	Ácido nitrilotriacético (NTA)	µg/L	N.E.	N.E.	200	N.E.
Fisicoquímicos	pH (potencial de hidrógeno)	unidades de pH	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-9.5
	Sólidos disueltos totales	mg/L	1000	500	1000	1000
	Turbiedad	UTN	5	5	5	Aceptable
	Corrosividad	-	N.E.	No corrosivo	N.E.	N.E.
	Oxidabilidad	mg/L O <sub>2</sub>	N.E.	N.E.	N.E.	5
Inorgánicos	Aluminio	mg/L	0.2	0.05 a 0.2	0.2	0.2
	Antimonio	mg/L	N.E.	0.006	0.02	0.5
	Arsénico	mg/L	0.05	0.01	0.01	0.001
	Asbesto	MF/L	N.E.	7	N.E.	N.E.
	Bario	mg/L	0.7	2	0.7	N.E.
	Berilio	mg/L	N.E.	0.004	N.E.	N.E.
	Boro	mg/L	N.E.	N.E.	0.5	1
	Cadmio	mg/L	0.005	0.005	0.003	0.005
	Cianuros (como CN <sup>-</sup> )	mg/L	0.07	0.2	0.07	N.E.
	Cloro residual libre	mg/L	0.2-1.50	N.E.	N.E.	N.E.
	Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	mg/L	250	250	N.E.	250
	Cobre	mg/L	2	1.3	2	2
	Cromo total	mg/L	0.05	0.1	0.05	0.05
	Fierro	mg/L	0.3	0.3	N.E.	0.2
	Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	mg/L	1.5	4	1.5	1.5
Manganeso	mg/L	0.15	0.05	0.4	0.05	
Mercurio	mg/L	0.001	0.002	0.006	0.01	
Molibdeno	mg/L	N.E.	N.E.	0.07	N.E.	

Propuesta del tren de tratamiento para la potabilización del agua del Acuífero del Valle del Mezquital como fuente alternativa de abastecimiento para el Valle de México

	<b>Níquel</b>	mg/L	N.E.	N.E.	0.07	0.02
	<b>Nitratos (como NO<sub>3</sub>)</b>	mg/L	10	10	11.3	50
	<b>Nitritos (como NO<sub>2</sub>)</b>	mg/L	1	1	1	0.5
	<b>Nitrógeno amoniacal (como N)</b>	mg/L	0.5	N.E.	N.E.	N.E.
	<b>Plata</b>	mg/L	N.E.	0.1	N.E.	N.E.
	<b>Plomo</b>	mg/L	0.01	0.015	0.01	0.01
	<b>Selenio</b>	mg/L	N.E.	0.05	0.01	0.01
	<b>Sodio</b>	mg/L	200	N.E.	200	200
	<b>Sulfatos (como SO<sub>4</sub>)</b>	mg/L	400	250	250	250
	<b>Sulfuros (como H<sub>2</sub>S)</b>	mg/L	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
	<b>Talio</b>	mg/L	N.E.	0.002	N.E.	N.E.
	<b>Yodo libre residual</b>	mg/L	0.2 - 0.5	N.E.	N.E.	N.E.
	<b>Zinc</b>	mg/L	5	5	N.E.	N.E.
<b>Orgánicos</b>	<b>1,1 dicloroetileno</b>	µg/L	N.E.	7	N.E.	N.E.
	<b>1,2-dibromoetano</b>	µg/L	N.E.	N.E.	0.4	N.E.
	<b>1,2-diclorobenceno</b>	µg/L	N.E.	N.E.	1000	N.E.
	<b>1,2-dicloroetano</b>	µg/L	N.E.	5	30	3
	<b>1,2-dicloroetano</b>	µg/L	N.E.	N.E.	50	N.E.
	<b>1,4-diclorobenceno</b>	µg/L	N.E.	N.E.	300	N.E.
	<b>1,2-Dicloropropano (1,2 DCP)</b>	µg/L	N.E.	5	40	N.E.
	<b>1,4-dioxano</b>	µg/L	N.E.	N.E.	50	N.E.
	<b>1,1,1-tricloroetano</b>	µg/L	N.E.	200	N.E.	N.E.
	<b>1,1,2-tricloroetano</b>	µg/L	N.E.	5	N.E.	N.E.
	<b>1,2,4-triclorobenceno</b>	µg/L	N.E.	70	N.E.	N.E.
	<b>Acido nitrilo acético</b>	µg/L	N.E.	N.E.	200	N.E.
	<b>Acrilamida</b>	µg/L	N.E.	N.E.	0.5	0.1
	<b>Benceno</b>	µg/L	N.E.	5	10	1
	<b>Benzopireno</b>	µg/L	N.E.	0.2	0.7	0.1
	<b>Bifenilos policlorados</b>	µg/L	N.E.	0.5	N.E.	N.E.
	<b>Cis-1,2-dicloroetileno</b>	µg/L	N.E.	70	N.E.	N.E.
	<b>Clorobenceno</b>	µg/L	N.E.	100	N.E.	N.E.
<b>Cloruro de vinilo</b>	µg/L	N.E.	2	0.3	0.5	
<b>Cloruro de cianógeno</b>	µg/L	N.E.	N.E.	70	N.E.	

Propuesta del tren de tratamiento para la potabilización del agua del Acuífero del Valle del Mezquital como fuente alternativa de abastecimiento para el Valle de México

<b>Di(2-etilhexil)adipato</b>	µg/L	N.E.	400	N.E.	N.E.
<b>Di(2-etilhexil)ftalato</b>	µg/L	N.E.	6	8	N.E.
<b>Dibromuro de etileno</b>	µg/L	N.E.	0.05	N.E.	N.E.
<b>Dicloroacetato</b>	µg/L	N.E.	N.E.	50	N.E.
<b>Diclorometano</b>	µg/L	N.E.	5	20	N.E.
<b>Dioxin (2,3,7,8-TCDD)</b>	µg/L	N.E.	3.00E-05	N.E.	N.E.
<b>Dureza total (como CaCO<sub>3</sub>)</b>	µg/L	500,000	N.E.	N.E.	N.E.
<b>EDTA</b>	µg/L	N.E.	N.E.	600	N.E.
<b>Epiclorhidrina</b>	µg/L	N.E.	N.E.	0.4	0.1
<b>Estireno</b>	µg/L	N.E.	100	20	N.E.
<b>Etilbenceno</b>	µg/L	300	700	300	N.E.
<b>Fenoles o compuestos fenólicos</b>	µg/L	300	N.E.	N.E.	N.E.
<b>Hexaclorobenceno</b>	µg/L	1	1	N.E.	N.E.
<b>Hexaclorobutadieno</b>	µg/L	N.E.	N.E.	0.6	N.E.
<b>Hexaclorociclopentadieno</b>	µg/L	N.E.	50	N.E.	N.E.
<b>Microcystin-LR</b>	µg/L	N.E.	N.E.	1	N.E.
<b>Monocloroacetato</b>	µg/L	N.E.	N.E.	20	N.E.
<b>o-diclorobenceno</b>	µg/L	N.E.	600	N.E.	N.E.
<b>p-diclorobenceno</b>	µg/L	N.E.	75	N.E.	N.E.
<b>Pyriproxyfen</b>	µg/L	N.E.	N.E.	300	N.E.
<b>SAAM</b>	µg/L	500	500	N.E.	N.E.
<b>Terbutilazina</b>	µg/L	N.E.	N.E.	7	N.E.
<b>Tetracloroetano</b>	µg/L	N.E.	N.E.	40	10
<b>Tetracloroetileno</b>	µg/L	N.E.	5	N.E.	N.E.
<b>Tetracloruro de carbono</b>	µg/L	N.E.	5	4	N.E.
<b>Tolueno</b>	µg/L	700	1,000	700	N.E.
<b>Trans-1,2-dicloroetileno</b>	µg/L	N.E.	100	N.E.	N.E.
<b>Tricloroacetato</b>	µg/L	N.E.	N.E.	200	N.E.
<b>Tricloroetano</b>	µg/L	N.E.	N.E.	20	10
<b>Tricloroetileno</b>	µg/L	N.E.	5	N.E.	N.E.



Propuesta del tren de tratamiento para la potabilización del agua del Acuífero del Valle del Mezquital como fuente alternativa de abastecimiento para el Valle de México

	Xileno (tres isómeros)	µg/L	500	10,000	500	N.E.
Plaguicidas	1,2-Dibromo-3-cloropropano (DBCP)	µg/L	N.E.	0.2	1	N.E.
	1,3-Dicloropropeno	µg/L	N.E.	N.E.	20	N.E.
	2,4 - D	µg/L	30	70	30	N.E.
	2,4-DB	µg/L	N.E.	N.E.	90	N.E.
	2,4,5-T	µg/L	N.E.	N.E.	9	N.E.
	2,4,5-TP (Silvex)	µg/L	N.E.	50	N.E.	N.E.
	Alaclor	µg/L	N.E.	2	20	N.E.
	Aldicarb	µg/L	N.E.	N.E.	10	N.E.
	Aldrín y dieldrín	µg/L	0.03	N.E.	0.03	0.03
	Atrazina	µg/L	N.E.	3	2	N.E.
	Carbofuran	µg/L	N.E.	40	7	N.E.
	Cianazina	µg/L	N.E.	N.E.	0.6	N.E.
	Clordano (total de isómeros)	µg/L	0.2	2	0.2	N.E.
	Clorotoluron	µg/L	N.E.	N.E.	30	N.E.
	Clorpirifos	µg/L	N.E.	N.E.	30	N.E.
	Dalapon	µg/L	N.E.	200	N.E.	N.E.
	DDT (total de isómeros)	µg/L	1	N.E.	1	N.E.
	Diclorprop	µg/L	N.E.	N.E.	100	N.E.
	Dimetoato	µg/L	N.E.	N.E.	6	N.E.
	Dinoseb	µg/L	N.E.	7	N.E.	N.E.
	Diquat	µg/L	N.E.	20	N.E.	N.E.
	Endothall	µg/L	N.E.	100	N.E.	N.E.
	Endrin	µg/L	N.E.	2	0.6	N.E.
	Fenoprop	µg/L	N.E.	N.E.	9	N.E.
	Glifosato	µg/L	N.E.	700	N.E.	N.E.
	Heptacloro y epóxido de heptacloro	µg/L	0.03	0.4 para heptacloro y 0.2 para el epóxido de heptacloro	N.E.	0.03
	Isoproturon	µg/L	N.E.	N.E.	9	N.E.
	Lindano	µg/L	2	0.2	2	N.E.
MCPA	µg/L	N.E.	N.E.	2	N.E.	
Mecoprop	µg/L	N.E.	N.E.	10	N.E.	

Propuesta del tren de tratamiento para la potabilización del agua del Acuífero del Valle del Mezquital como fuente alternativa de abastecimiento para el Valle de México

	<b>Metolaclor</b>	µg/L	N.E.	N.E.	10	N.E.
	<b>Metoxicloro</b>	µg/L	20	40	20	N.E.
	<b>Oxamilo (vydate)</b>	µg/L	N.E.	200	N.E.	N.E.
	<b>Pendimetalina</b>	µg/L	N.E.	N.E.	20	N.E.
	<b>Pentaclorofenol</b>	µg/L	N.E.	1	9	N.E.
	<b>Permetrina</b>	µg/L	N.E.	N.E.	300	N.E.
	<b>Picloram</b>	µg/L	N.E.	500	N.E.	N.E.
	<b>Simazina</b>	µg/L	N.E.	4	2	N.E.
	<b>Toxafeno</b>	µg/L	N.E.	3	N.E.	N.E.
	<b>Trifluralin</b>	µg/L	N.E.	N.E.	20	N.E.
<b>Desinfectantes</b>	<b>Monocloramina</b>	mg/L	N.E.	N.E.	3	N.E.
	<b>Cloro</b>	mg/L	N.E.	4	5	N.E.
	<b>Dioxido de cloro (ClO<sub>2</sub>)</b>	mg/L	N.E.	0.8	N.E.	N.E.
<b>Subproductos de la desinfección</b>	<b>2,4,6-triclorofenol</b>	mg/L	N.E.	N.E.	0.2	N.E.
	<b>Ácido dicloroacético</b>	mg/L	N.E.	0	N.E.	N.E.
	<b>Ácidos haloacéticos</b>	mg/L	N.E.	0.06	N.E.	N.E.
	<b>Ácido tricloroacético</b>	mg/L	N.E.	0	N.E.	N.E.
	<b>Bromato</b>	mg/L	N.E.	0.01	0.01	N.E.
	<b>Bromodiclorometano</b>	mg/L	N.E.	0.3	0.06	N.E.
	<b>Bromoformo</b>	mg/L	N.E.	0	0.1	0.01
	<b>Cloraminas (como Cl<sub>2</sub>)</b>	mg/L	N.E.	4	N.E.	N.E.
	<b>Clorato</b>	mg/L	N.E.	N.E.	0.7	N.E.
	<b>Clorito</b>	mg/L	N.E.	1	0.7	N.E.
	<b>Cloroformo</b>	mg/L	N.E.	N.E.	0.3	N.E.
	<b>Dibromoacetnitrilo</b>	mg/L	N.E.	N.E.	0.07	N.E.
	<b>Dibromoclorometano</b>	mg/L	N.E.	N.E.	0.1	N.E.
	<b>Dicloroacetnitrilo</b>	mg/L	N.E.	N.E.	0.02	N.E.
<b>Trihalometanos totales</b>	mg/L	0.2	0.08	N.E.	N.E.	
<b>Radiactivos</b>	<b>Radiactividad alfa global</b>	Bq/L	0.56	N.E.	N.E.	N.E.
	<b>Radiactividad beta global</b>	Bq/L	1.85	N.E.	N.E.	N.E.
	<b>Partículas alfa</b>	pCi/L	N.E.	15	N.E.	N.E.

Propuesta del tren de tratamiento para la potabilización del agua del Acuífero del Valle del Mezquital como fuente alternativa de abastecimiento para el Valle de México

---

	<b>Partículas beta y emisores fotón</b>	mrems/year	N.E.	4	N.E.	N.E.
	<b>Radio 226 y 228 combinados</b>	pCi/L	N.E.	5	N.E.	N.E.
	<b>Uranio</b>	mg/L	N.E.	0.03	0.015	N.E.
	<b>Tritio</b>	Bq/L	N.E.	N.E.	N.E.	100
	<b>Dosis indicativa total</b>	mSv/año	N.E.	N.E.	N.E.	0.1