



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES  
EN LOS SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN DE LA  
CIUDAD DE MÉXICO**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA AMBIENTAL - AGUA

P R E S E N T A :

**I.Q.I. THANIA ELOINA FÉLIX CAÑEDO**

TUTORA:

**DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS**



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente:	Dr. Alfonso Durán Moreno
Secretaria:	M. en I. Ana Elisa Silva Martínez
Vocal:	Dra. Blanca Jiménez Cisneros
1 <sup>er</sup> . Suplente:	Dr. Richard Gibson
2 <sup>do</sup> . Suplente:	Dra. Sofía Esperanza Garrido Hoyos

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**TUTOR DE TESIS:**

DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS

---

## DEDICATORIAS

*Al centro de mi existencia "Mi Familia". A Rogelio Félix Medina, el hombre máspreciado en mi vida; Padre, tus cuidados, cariños, enseñanzas y consejos, van implícitos en este logro y en todos y cada uno de mis pequeños y grandes triunfos; soy la hija más afortunada del mundo por tenerte. A Martha Alicia Pérez de Félix, a mi madre de aquí y hasta el cielo; por la fortaleza que representas como mujer, sembrando en mi el temperamento, la disciplina y el ímpetu con que se debe subsistir en esta vida. A mis tres hermosas hermanas: mis mejores amigas y más leales confidentes; Thelma Nahomy, porque en base a tu paciencia y cariño incondicional has sido mi principal apoyo, y nunca me dejaste caer en los momentos más difíciles; Karla Daniela y Sirigui Garibeth, porque llegaron a mi vida complementándola de una manera increíble, ahora forman parte de mi esencia. En nombre de toda mi familia le brindo una dedicatoria especial a mi hermana Daniela, quién en éste último par de años nos ha concedido grandes alegrías, colmando nuestra vida de felicidad con la radiante primicia de tener en su vientre a un próximo integrante. A los verdaderos amigos que pese a la distancia, la confraternidad sigue intacta. A mi perpetua adoración, porque a través de los años el destino nos ha concedido la perseverancia, sensatez y fortuna de mantenernos unidos.*

*A todas las personas que de alguna manera tuvieron una influencia a lo largo de esta apremiante experiencia, muchas gracias por los buenos, tristes y tan jubilosos momentos, todos los atesoraré con llave de oro.*

## AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, porque a través de sus excelentes programas de estudio nos permite a los estudiantes desarrollarnos como profesionistas de calidad; y en especial al **Instituto de Ingeniería**, por darme las facilidades para el desarrollo del presente trabajo de investigación. Asimismo a través de dicha Alma máter, agradezco al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el apoyo económico brindado para poder solventar la estancia.

A la **Dra. Blanca E. Jiménez Cisneros** por la enorme paciencia y dedicación que me brindó semana con semana al dirigir el presente trabajo, así como la orientación y el conocimiento con que me apoyó a lo largo de estos dos años. Del mismo modo, por la disciplina y las reprimendas que seguramente en un futuro no muy lejano, se proyectarán en mí como una mujer con carácter.

A los integrantes del jurado de exámen **Dr. Alfonso Durán Moreno, Dr. Richard Gibson, Dra. Sofia Garrido Hoyos y M. en I. Ana Elisa Silva Martínez**, por las aportaciones finales que de manera general enriquecieron el trabajo convirtiéndolo en un proyecto valorable.

A los pilares del Grupo de Tratamiento y Reuso: **Dra. Alma Chávez** quien desde el principio me brindó una cordial bienvenida al grupo y me facilitó las herramientas para formar parte de él trabajando en armonía. A la **M. en C. Catalina Maya Rendón** con quien tuve el gusto de compartir el trabajo dentro del proyecto, de quien aprendí a laborar de una manera organizada, eficiente y pulcra. Y muy en especial al **M. en I. Elías Beceril Bravo**, quien compartió conmigo todo su conocimiento para sacar adelante el trabajo de laboratorio, convirtiéndolo en una satisfactoria labor al dirigir estratégicamente el proyecto; del mismo modo, resaltar lo gratificante que fueron para mí sus enseñanzas, consejos, ilustradas pláticas, y los muy buenos y joviales momentos que compartimos. Dentro de este mismo apartado quisiera mencionar al **M. en I. Juan Carlos Alvarez Durán**, quien considero es un componente sumamente importante dentro del grupo, ya que a

lo largo de su estancia en éste ha logrado reunir considerable experiencia, la cual siempre está dispuesto a compartir con todos los compañeros del grupo; gracias por todo el apoyo, consejos y muy buenos cotilleos.

A mis compañeros de cubículo **Said, Emilio, Wendy, Marc, Karina, Oriana, Anemir, Jorge, Alejandro, Andrés y Diana(s)** haciendo del trabajo una estancia placentera y de quienes tengo presente una magnífica amistad. Muestro un agradecimiento especial a la **Ing. Carolina Reyes y la Q.A. Ana Ruiz**, por todas las atenciones, facilidades y asistencias que nos ofrecen por medio de un eficiente y amable servicio. Carito dejaste huella en este grupo.

A mis compañeros de la maestría **Magaly, Iris, Audys, Marcos, Nicolás, Adrian, Fabian, Víctor, Arnold, Leo, Adriana, Ariadna, Juan Fernando, Gildardo, Edgar, David, Flor, Ricardo y Ezequiel**, cuya amistad representa la mejor gratificación en esta incomparable experiencia, y quienes, al encontrarme lejos del hogar, se convirtieron en “*La Familia*” (y sobre todo ¡que buenas rumbas!). Asimismo a **Enrique y Brenda**, expresarles que para mí fue más que agradable haber compartido con ustedes día con día un acogedor hogar.

## CONTENIDO

CONTENIDO	1
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	12
HIPÓTESIS	15
OBJETIVO GENERAL	15
METAS	15
ALCANCES	15
1. ANTECEDENTES	16
1.1 Descripción de la zona de estudio: Zona Metropolitana de la Ciudad de México	16
1.1.1 Características geográficas y climatológicas	16
1.1.2 Abastecimiento de agua	16
1.1.2.1 Fuentes internas	17
1.1.2.2 Fuentes externas	20
1.1.3 Sistemas de potabilización del agua	23
1.1.3.1 Sistema convencional	24
1.1.3.2 Sistema avanzado	31
1.1.4 Infraestructura para el suministro de agua potable	36
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	38
2.1 Contaminantes Emergentes	38
2.2 Fuentes de contaminantes emergentes	41
2.2.1 Fármacos	41
2.2.2 Disruptores endocrinos	42
2.3 Presencia de contaminantes emergentes en el ambiente acuático	43
2.3.1 Agua superficial	44

2.3.2 Agua subterránea	44
2.4 Mecanismos de atenuación natural de contaminantes emergentes en el agua	45
2.4.1 Biodegradación	45
2.4.2 Fotodegradación	46
2.4.3 Sorción	46
2.5 Diferentes tecnologías para remoción de contaminantes emergentes en agua potable	47
3. METODOLOGÍA	50
3.1 Selección de los Contaminante Emergentes	50
3.2 Selección de los sitios de muestreo	51
3.3 Muestreo y análisis	54
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
4.1 Presencia de contaminantes emergentes en las fuentes de abastecimiento	56
4.1.1 Fármacos	56
4.1.1.1 Pozos	56
4.1.1.2 Presas	59
4.1.1.3 Tanques	61
4.1.1.4 Límites provisionales en agua potable	63
4.1.2 Disruptores endocrinos	64
4.1.2.1 Pozos	64
4.1.2.2 Presas	68
4.1.2.3 Tanques	69
4.1.2.4 Normatividad internacional en agua superficial y potable	72
4.1.3 Ubicación de las fuentes con mayor incidencia de contaminantes emergentes	74
4.1.3.1 Pozos	74
4.1.3.2 Tanques	75



4.2 Comparación de la concentración de contaminantes emergentes en agua residual con las fuentes de agua	76
4.2.1 Fármacos	76
4.2.1.1 Pozos	76
4.2.1.2 Presas	78
4.2.2 Disruptores endocrinos	79
4.2.2.1 Pozos	79
4.2.2.2 Presas	80
4.3 Eficiencia de remoción de contaminantes emergentes en los sistemas de potabilización	82
4.3.1 Sistema de potabilización convencional	82
4.3.1.1 Planta potabilizadora Los Berros	83
4.3.1.2 Planta potabilizadora Madín	85
4.3.1.3 Análisis de los porcentajes de remoción determinados por compuesto	87
4.3.2 Sistema de potabilización avanzado	91
4.3.2.1 Planta potabilizadora El Sifón y Santa Catarina 13	91
4.3.2.2 Planta potabilizadora Agrícola Oriental y Santa María Aztahuacán	92
4.3.2.3 Planta potabilizadora Santa Cruz Meyehualco	94
4.3.2.4 Análisis de los porcentajes de remoción determinados por compuesto	95
4.3.3 Propuesta teórica de un tren de tratamiento para remover los contaminantes emergentes	97
5. CONCLUSIONES	100
5.1 Presencia de contaminantes emergentes en las fuentes de abastecimiento	100
5.2 Comparación de las concentraciones de contaminantes encontradas en las fuentes de suministro y las reportadas en agua residual	101

5.3 Eficiencia de remoción de contaminantes emergentes en los sistemas de potabilización	101
5.4 Propuesta teórica de un tren de tratamiento para remover los contaminantes emergentes	101
RECOMENDACIONES	102
BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXOS	119
ANEXO A. Descripción de la técnica analítica utilizada para la determinación de contaminantes emergentes	
ANEXO B. Condiciones del sistema de tratamiento de las plantas potabilizadoras avanzadas monitoreadas	
ANEXO C. Concentraciones de contaminantes emergentes en agua superficial, subterránea y potable en diferentes países	

## ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1.1 Características de los elementos que componen el sistema Cutzamala
- Tabla 2.1 Clases de contaminantes emergentes
- Tabla 2.2 Remoción (%) de contaminantes emergentes mediante diferentes tecnologías
- Tabla 3.1 Criterios de selección de contaminantes emergentes
- Tabla 3.2 Sitios muestreados por caracterización de tipo de fuentes de suministro y población que abastecen de agua en la ZMCM
- Tabla 4.1 Porcentajes de eliminación y remanencia de fármacos en pozos
- Tabla 4.2 Porcentajes de eliminación y remanencia de fármacos en presas
- Tabla 4.3 Porcentajes de eliminación y remanencia de disruptores endocrinos en pozos
- Tabla 4.4 Porcentajes de eliminación y remanencia de disruptores endocrinos en presas
- Tabla 4.5 Eficiencia de remoción (%) de fármacos en los sistemas de potabilización convencionales
- Tabla 4.6 Eficiencia de remoción (%) de disruptores endocrinos en los sistemas de potabilización convencionales
- Tabla 4.7 Eficiencia de remoción (%) de disruptores endocrinos en los sistemas avanzados
- Tabla 4.8 Remoción (%) de contaminantes emergentes mediante los procesos propuestos

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1 Fuentes de abastecimiento de agua potable en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)
- Figura 1.2 Perfil del Sistema Cutzamala
- Figura 1.3 Tanque de recepción de aguas crudas en la planta Los Berros
- Figura 1.4 Medidores Parshall en la planta Los Berros
- Figura 1.5 Sección de floculación en la planta Los Berros
- Figura 1.6 Sección de sedimentación en la planta Los Berros
- Figura 1.7 Filtración final en la planta Los Berros
- Figura 1.8 Espesador de lodos en la planta Los Berros
- Figura 1.9 Caja amortiguadora en la planta Madín
- Figura 1.10 Medición del caudal y adición del coagulante en la planta Madín
- Figura 1.11 Tanque de floculación en la planta Madín
- Figura 1.12 Sistema de sedimentación rápida en la planta Madín
- Figura 1.13 Sección de filtración en la planta Madín
- Figura 1.14 Agua potable clorada y almacenada en la planta Madín
- Figura 1.15 Torres de desorción y/o desgasificación en las plantas potabilizadoras avanzadas
- Figura 1.16 Torres de biofiltración en las plantas potabilizadoras avanzadas
- Figura 1.17 Filtración a presión y a gravedad en las plantas potabilizadoras avanzadas
- Figura 1.18 Tanque de contacto de ozono y generador de ozono en las plantas potabilizadoras avanzadas
- Figura 1.19 Torres de adsorción en las plantas potabilizadoras avanzadas
- Figura 1.20 Equipos de ósmosis inversa en las plantas potabilizadoras avanzadas
- Figura 1.21 Regulador y tanque de almacenamiento de hipoclorito de sodio en las plantas potabilizadoras avanzadas

Figura 2.1 Fuentes y rutas de la presencia de residuos de fármacos en el ambiente acuático

Figura 3.1 Ubicación de los sitios de muestreo

Figura 3.2 Toma de muestra en presa y pozo

Figura 3.3 Toma de muestra a) con obra de toma, b) sin obra de toma

Figura 3.4 Transporte de muestras

Figura 4.1 Concentraciones de fármacos en agua de pozos de la ZMCM en periodo de estiaje y su relación con la capacidad de adsorción por suelo

Figura 4.2 Concentraciones de fármacos en agua de pozos de la ZMCM en periodo de lluvia y su relación con la capacidad de adsorción por suelo

Figura 4.3 Concentraciones de fármacos en agua de presas que abastecen el Sistema Cutzamala y su relación con la capacidad de biodegradabilidad

Figura 4.4 Concentraciones de fármacos en agua de tanques de la ZMCM en periodo de estiaje y su relación con la solubilidad en agua

Figura 4.5 Concentraciones de fármacos y ácidos en agua de tanques de la ZMCM en periodo de estiaje y su relación con la solubilidad en agua

Figura 4.6 Límite provisiones para ácido salicílico, ácido clofíbrico, dicloenaco e ibuprofeno en agua potable

Figura 4.7 Concentraciones de disruptores endocrinos en agua de pozos de la ZMCM en periodo de estiaje y su relación con la capacidad de adsorción por suelo

Figura 4.8 Concentraciones de disruptores endocrinos en agua de pozos de la ZMCM en periodo de lluvia y su relación con la capacidad de adsorción por suelo

Figura 4.9 Concentraciones de disruptores endocrinos en agua de presas

que abastecen el Sistema Cutzamala y su relación con la capacidad de biodegradabilidad

- Figura 4.10 Concentraciones de disruptores endocrinos en agua de tanques de la ZMCM en periodo de estiaje y su relación con la solubilidad en agua
- Figura 4.11 Concentraciones de disruptores endocrinos en agua de tanques de la ZMCM en periodo de lluvia y su relación con la solubilidad en agua
- Figura 4.12 Límites establecidos para dietilhexilftalato (DEHF) en agua potable y superficial
- Figura 4.13 Límites establecidos para nonilfenoles y butilbencilftalato en agua superficial
- Figura 4.14 Ubicación de los pozos con mayor concentración de contaminantes emergentes
- Figura 4.15 Ubicación de los tanques con mayor concentración de contaminantes emergentes
- Figura 4.16 Comparación de la concentración de fármacos en agua residual con agua de pozos que abastecen al norte y este de la ZMCM en periodo de estiaje
- Figura 4.17 Comparación de la concentración de fármacos en agua residual con agua de presas que abastecen al Sistema Cutzamala
- Figura 4.18 Comparación de la concentración de disruptores endocrinos en agua residual con agua de pozos que abastecen al norte y este de la ZMCM en periodo de estiaje
- Figura 4.19 Comparación de la concentración de disruptores endocrinos en agua residual con agua de presas que abastecen al Sistema Cutzamala
- Figura 4.20 Concentraciones de contaminantes emergentes en el influente y efluente de la planta potabilizadora Los Berros, en

periodo de lluvia

- Figura 4.21 Concentraciones de contaminantes emergentes en el influente y efluente de la planta potabilizadora Los Berros, en periodo de estiaje
- Figura 4.22 Concentraciones de contaminantes emergentes en el influente y efluente de la planta potabilizadora Madín, en periodo de lluvia
- Figura 4.23 Concentraciones de contaminantes emergentes en el influente y efluente de la planta potabilizadora Madín, en periodo de estiaje
- Figura 4.24 Concentraciones de contaminantes emergentes en el influente y efluente de las plantas potabilizadoras: (a) el Sifón y (b) Santa Catarina 13
- Figura 4.25 Concentraciones de contaminantes emergentes en el influente y efluente de las plantas potabilizadoras: (a) Agrícola Oriental y (b) Santa María Aztahuacán
- Figura 4.26 Concentraciones de contaminantes emergentes en el influente y efluente de la planta potabilizadora Santa Cruz Meyehualco

## RESUMEN

La escasez de agua para consumo en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), ha propiciado que el suministro de este recurso priorice la cantidad sobre la calidad. Ésta última, se evalúa únicamente mediante algunos parámetros microbiológicos y fisicoquímicos, sin considerar nuevas sustancias contaminantes. Ejemplo de ello son los fármacos y compuestos con potencial de disrupción endócrina, cuyos efectos han sido recientemente demostrados y dado su novedad no son aún legislados. La principal fuente de estos contaminantes es el agua residual, y en un acuífero que muestra numerosas infiltraciones su presencia es esperada. Además, los sistemas de potabilización, al ser los mismos desde hace treinta años, no contemplan la remoción de estos nuevos contaminantes y los trenes de tratamiento avanzado recién implementados no han sido empleados de manera apropiada. El objetivo de este trabajo fue evaluar la presencia de 17 contaminantes emergentes, siete fármacos (ácido salicílico, ácido clofíbrico, diclofenaco, gemfibrozil, ibuprofeno, ketoprofeno y naproxeno) y diez disruptores endocrinos (bisfenol A, butilbencilftalato, dietilhexilftalato, estradiol, estrona, etinilestradiol, nonilfenoles, pentaclorofenol, triclosán y 2, 4-D), en las diferentes fuentes de suministro de agua (pozos, presas y tanques) de la ZMCM. Así como analizar su posible remoción por medio de los sistemas de potabilización disponibles. Para ello, 12 tanques, 4 presas y 7 pozos fueron monitoreados durante la época de lluvia y estiaje en la ZMCM, las concentraciones encontradas de los contaminantes emergentes fueron comparadas con aquellas reportadas en el agua residual y se evaluó la remoción de éstos en algunos sistemas de potabilización convencionales y avanzados. Las presas presentaron el menor número de compuestos y una mayor concentración, en contraste con los tanques donde se hallaron todos los compuestos en bajas concentraciones, probablemente debido un efecto de mezclado. Por otra parte, se encontró efecto de la estación (lluvia o estiaje) en la concentración de los contaminantes emergentes en los pozos y tanques. Los sitios más contaminados fueron los pozos al norte y los tanques al oriente de la ZMCM. Las concentraciones



de los compuestos en estudio encontradas en el agua de los pozos y las presas llegaron a ser menores del 1% y hasta 52%, respectivamente, de aquellas reportadas en el agua residual. La evaluación de los sistemas de potabilización mostró que los trenes de tratamiento convencionales remueven mayor cantidad de contaminantes emergentes (fármacos 100% y disruptores endocrinos entre 25 y 95%) que los sistemas avanzados (entre 40 y 80% sólo para dos disruptores endocrinos), contrario a lo reportado en la literatura. Ello se debe al inadecuado empleo y mantenimiento de los sistemas avanzados. Finalmente, con base en las remociones observadas en los sistemas de potabilización, se propuso el siguiente tren de tratamiento para la remoción de contaminantes emergentes:

precloración – coagulación – floculación – sedimentación – filtración – adsorción – desinfección

## INTRODUCCIÓN

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) es la mancha urbana más importante del país con 21 millones de habitantes. En este sitio, los organismos operadores de agua han enfocado su atención en satisfacer la demanda de agua en cantidad, más que en calidad. Aunado a esta situación, los sistemas de potabilización y los parámetros seleccionados para vigilar su funcionamiento, han sido los mismos desde hace más de tres décadas. Ello a pesar de que la calidad de las fuentes de suministro, se han deteriorado a causa de la falta de control de la contaminación (Jiménez, 2005).

Por otra parte, para evaluar la calidad del agua potable la norma “NOM-127-SSA1-1994 salud ambiental, agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”, contempla contaminantes convencionales. La característica que tienen en común, es que se conocen bien sus efectos así como su comportamiento en los diversos métodos de tratamiento. Sin embargo, existe otro tipo de contaminantes orgánicos que no han sido legislados y que son denominados “contaminantes emergentes”. Estos compuestos son de preocupación reciente por sus efectos potenciales en la salud humana y en el ambiente. Además de ello, son compuestos que no son removidos mediante las tecnologías convencionales de potabilización (Kümmerer, 2004). Por ello, se integran en el ciclo hidrológico, y por su persistencia hoy en día es común encontrarlos en fuentes de suministro.

Por lo anterior, el propósito del presente trabajo es evaluar la presencia de contaminantes emergentes en las principales fuentes de suministro de agua de la Ciudad de México, y junto con ello, establecer su comportamiento en los sistemas actuales de potabilización. Con esta información, se pretende proponer de manera teórica un tren de tratamiento para remover aquellos que se encuentren.

Esta tesis se divide en cinco capítulos. En el primero, se hace una descripción de la zona de estudio, describiendo de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México los siguientes temas: características geográficas y climatológicas, abastecimiento de agua, sistemas de potabilización y la infraestructura para el suministro de agua potable.

En el capítulo dos, por un lado se describen los contaminantes emergentes en cuanto a su clasificación, fuentes y efectos. Por otro lado, a partir de la bibliografía se aportan datos sobre el contenido de contaminantes emergentes en aguas de suministro de diferentes países; así como los mecanismos de atenuación natural que intervienen en su degradación. Por último, se presentan los mecanismos de funcionamiento de las tecnologías que pueden ser empleadas para remover contaminantes emergentes.

En el capítulo tres se describe la metodología propuesta para llevar a cabo el trabajo experimental. En primer instancia, se plantean los criterios empleados para seleccionar los contaminantes emergentes por evaluar. En seguida, se especifica el diseño del monitoreo de las fuentes de abastecimiento, así como el correspondiente para las plantas potabilizadoras. Posteriormente, se reseña de manera general la forma en que se llevó a cabo el muestreo y análisis, explicando también la técnica analítica utilizada para determinar los contaminantes de interés.

En el capítulo cuatro se presentan los resultados respecto de la presencia y cuantificación de fármacos y disruptores endocrinos, tanto en periodo de lluvias como de estiaje para las diferentes fuentes de abastecimiento, y se analiza su presencia por tipo de fuente y de compuesto. Por otra parte se hace una comparación de la concentración encontrada de contaminantes emergentes en las fuentes de agua con lo reportado en agua residual. Finalmente, se hace un análisis de la remoción de contaminantes emergentes en algunos sistemas de

potabilización, y con ello, se hace la propuesta de un tren de tratamiento posiblemente capaz de remover dichos compuestos.

En el último capítulo, se presentan las conclusiones en relación con el objetivo planteado y los resultados obtenidos. Y finalmente, las recomendaciones propuestas con base en los alcances que se pretenden en el trabajo de tesis.

## **HIPÓTESIS**

En las fuentes de abastecimiento de agua de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México es posible encontrar contaminantes emergentes que son removidos en algunos de los sistemas de potabilización que actualmente se emplean.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la presencia y posible remoción de contaminantes emergentes en el sistema de suministro de agua de la Ciudad de México.

## **METAS**

- Determinar el contenido de contaminantes emergentes en fuentes de abastecimiento de agua representativas de la ZMCM.
- Evaluar la remoción de los contaminantes emergentes encontrados en el influente y efluente de los sistemas de potabilización.

## **ALCANCES**

- Los contaminantes emergentes por estudiar se limitarán a siete fármacos y nueve disruptores endocrinos, seleccionados con base en su presencia, potencial de riesgo y capacidad analítica disponible.
- Las fuentes de suministro se limitarán a las más representativas en términos de cantidad de población abastecida en la zona de estudio.
- Los sistemas de potabilización por estudiar serán algunos con tratamiento avanzado para agua subterránea y con tratamiento convencional para agua superficial.

## 1. ANTECEDENTES

En este capítulo, se hace una descripción general de la zona de estudio. En primer lugar, se presentan algunas características geográficas y climatológicas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). En seguida, se explica cómo se distribuye el abastecimiento de agua en esta zona, a partir de las fuentes internas y externas. Por último, se describe la infraestructura para el suministro de agua potable para la Ciudad de México.

### 1.1 Descripción de la zona de estudio: Zona Metropolitana de la Ciudad de México

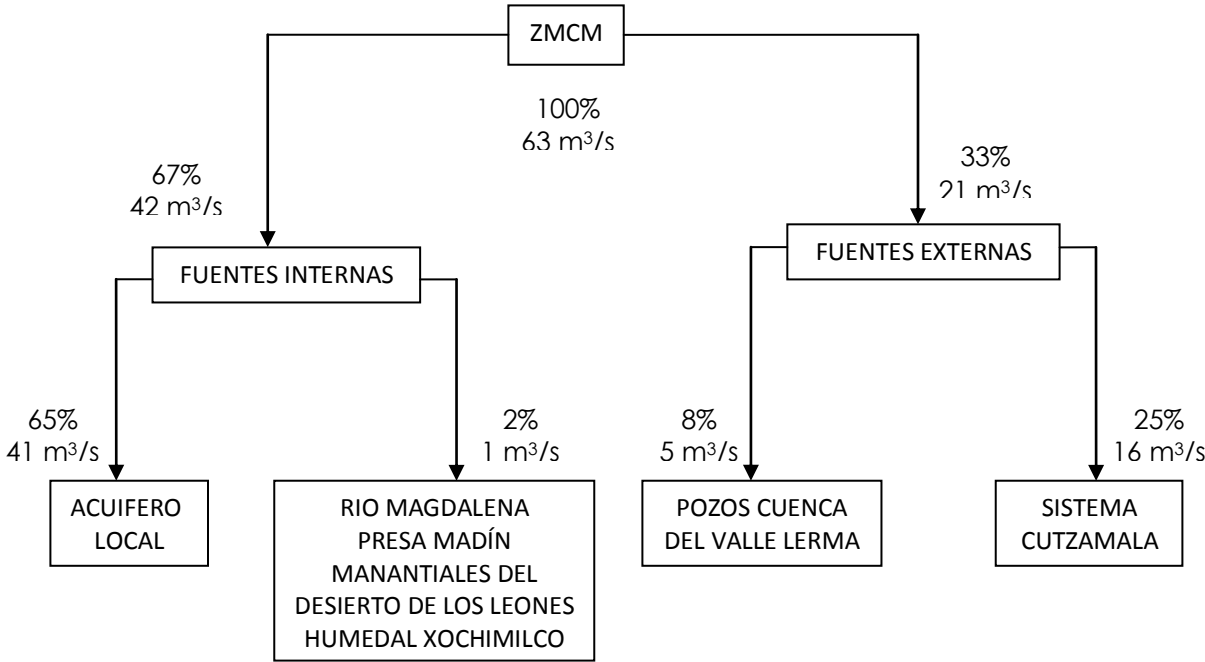
#### 1.1.1 Características geográficas y climatológicas

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se compone por el Distrito Federal (16 delegaciones), 40 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca, perteneciente al Estado de Hidalgo (INEGI, 2005). La ciudad se asienta dentro de la Cuenca del Valle de México, la cual se localiza en la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano, y abarca aproximadamente un área de 9,000 km<sup>2</sup>. La cuenca se sitúa a una altitud promedio de 2,400 msnm y se encuentra rodeada por montañas con elevaciones superiores a los 5,000 msnm. La temperatura promedio anual de la cuenca es de 15 °C. La precipitación que se concentra en unas cuantas tormentas intensas que por lo regular se presentan de junio a septiembre, es de 700 milímetros de agua de lluvia (CONAGUA, 2005).

#### 1.1.2 Abastecimiento de agua

En total en la ZMCM a partir de la red de suministro se emplean 63 m<sup>3</sup>/s (100%) de agua (figura 1.1). La mayor parte de ésta proviene de las **fuentes internas**, es

decir, del acuífero local (41 m<sup>3</sup>/s, 65%) y de algunos manantiales y aguas superficiales (1 m<sup>3</sup>/s, 2%); el resto, proviene de **fuentes externas** que aportan un total de 21 m<sup>3</sup>/s (33%). Del total del agua que se importa, 5 m<sup>3</sup>/s (8%) proviene de pozos ubicados en la cuenca del Valle de Lerma y 16 m<sup>3</sup>/s (25%) del sistema Cutzamala. Para transportar el agua desde las fuentes externas de 60 a 154 kilómetros de distancia y vencer una elevación de 1,200 msnm, se requiere de 102 plantas de bombeo (Jiménez, 2005).



**Figura 1.1 Fuentes de abastecimiento de agua potable en la zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)**

**1.1.2.1 Fuentes internas**

Las fuentes internas corresponden esencialmente, a los pozos que extraen el agua del acuífero local. Los pozos se encuentran distribuidos en toda la ZMCM, y en conjunto aportan el 65% del agua suministrada mediante la red. Respecto de las

fuentes internas superficiales de la cuenca, éstas corresponden a algunos manantiales, presas, el río Magdalena y el humedal de Xochimilco, contribuyendo todas ellas con un aporte total equivalente al 2%.

### **Agua Subterránea**

La cuenca de México incluye tres zonas geotécnicas: la lacustre, la de transición y la montañosa. La mayor parte de la recarga del acuífero ocurre en la zona de transición entre las regiones lacustre y montañosa, durante la época de lluvias (Ezcurra *et al.*, 2006). Este sistema puede ser dividido en cuatro subsistemas interconectados (acuíferos) desde los cuales se suministra la mayor parte del agua a la zona metropolitana. Éstos son:

- Xochimilco – Tláhuac –Chalco, al sur
- ZMCM, principalmente al oeste
- Lago de Texcoco, al este
- Teoloyucan – Tizayuca – Los Reyes – Chiconautla, al norte

Debido al rápido crecimiento de la población de la Ciudad de México, aunado a la demanda de agua, se provocó la sobreexplotación de los mantos acuíferos locales, con el consecuente descenso del nivel del agua subterránea y el hundimiento diferencial del suelo en diversas partes de la ciudad. Esta sobreexplotación provocó que a partir de la década de 1930 se invirtiera el gradiente hidráulico del acuífero; en consecuencia, en aquellos lugares donde se generaban manantiales se tuvo que instalar pozos de extracción a profundidades que van desde los 70 m hasta cerca de 300 m (Ezcurra *et al.*, 2006). La excavación cada vez más profunda de los pozos, ha traído como consecuencia un alto contenido de sustancias (como hierro y manganeso) en el agua, disminuyendo su calidad y aumentando los costos de potabilización.



## **Agua Superficial**

Los cuerpos de agua naturales en la mancha urbana casi han desaparecido. Lo que aún subsiste es una pequeña sección del Lago de Texcoco, que es en esencia un reservorio artificialmente construido (Lago Nabor Carrillo), algunos de los antiguos canales de Xochimilco, Chalco y San Luis Tlaxialtemalco, y una presa en Zumpango. También subsisten los manantiales del Desierto de los Leones y de las fuentes brotantes, que surgen en el poniente y sur de la Ciudad de México.

Otra aportación proviene de la cuenca del río Magdalena, que se encuentra dentro de la ciudad de México. Este río nace en las estribaciones de los cerros Palma, San Miguel, Cochinos y Coconetla, entre los más importantes. Tiene una elevación aproximada de 3,650 msnm, su curso es en dirección noreste y su cauce es de una longitud aproximada de 21,600 m. Presenta un volumen de agua permanente de aproximadamente 1 m<sup>3</sup>/s, y su escurrimiento máximo estimado es de 20.1 m<sup>3</sup>/s. Gran parte de su cuenca está localizada en zona de reserva ecológica, pero una amplia superficie de la misma se encuentra en proceso de avanzada deforestación y degradación ambiental.

Por último, se tiene la presa Madín cuyas funciones son regular los caudales (avenidas) del río Tlalnepantla. Esta cuenca tiene una capacidad total de 24,700,000 m<sup>3</sup>. Del volumen almacenado en la presa, aproximadamente 500 L/s son bombeados a la planta potabilizadora del mismo nombre, para ser tratados y distribuidos a algunas poblaciones del Estado de México, pertenecientes a la ZMCM. Los excedentes del agua no utilizada para los fines hidráulicos, se conducen al Interceptor Poniente mezclándolos con las aguas del drenaje.

### **1.1.2.2 Fuentes Externas**

El excesivo crecimiento de la población de la ZMCM, dio origen a los proyectos de importación de agua desde cuencas vecinas. El primer sistema externo en aportar agua fue el Valle de Lerma ubicado en el Estado de México a 62 km de la ciudad de México. Debido a la sobreexplotación del Lerma, y la constante demanda de agua por parte de la ZMCM, fue necesario traer agua de fuentes aun más lejanas, por lo que en 1982 se inició la importación de agua del Sistema Cutzamala, a 130 km de la ZMCM. En total, ambos sistemas aportan 21 m<sup>3</sup>/s, lo que representa el 33% del abastecimiento total a la ZMCM (Perló y González, 2005).

#### **El Sistema Lerma**

El sistema Lerma se encuentra en el valle de Toluca, al poniente de la ciudad de México, y ocupa aproximadamente un área de 2,236 km<sup>2</sup>. Este sistema fue construido en dos etapas. La primera inaugurada en 1951, consistió en captar agua subterránea mediante la construcción de cinco pozos, de donde se conduce el agua por medio de un acueducto de 60 km hasta los tanques de Dolores en el Bosque de Chapultepec (Castelan, 2002). En la segunda, se perforaron baterías de pozos (230) para enviar hasta 14 m<sup>3</sup>/s. Esta sobreexplotación ocasionó hundimientos y otros signos de agotamiento del manto acuífero del Lerma, por lo que para proteger la región se disminuyó la extracción de carga a 5 m<sup>3</sup>/s (Perló y González, 2005).

Ya que el agua es extraída directamente del acuífero de la región, y en general se considera de buena calidad, no existe una planta de potabilización. Sin embargo, a lo largo de su trayecto hasta la ZMCM es clorada en los tanques de almacenamiento de Dolores en Chapultepec, y posteriormente, antes de su distribución por medio de la red de abastecimiento.

## **El Sistema Cutzamala**

Por la insuficiencia del sistema Lerma, en la década de los sesenta se evaluaron nuevas alternativas para traer agua a la ZMCM. De ello, se concretó el Sistema Cutzamala. El proyecto consistió en aprovechar el agua almacenada en un conjunto de presas, conocido como Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, localizadas en la parte alta de la cuenca del Cutzamala (Castelan, 2002). Este sistema básicamente se construyó en tres etapas. La primera inaugurada en 1982, consistió en traer agua de la presa Victoria y conducirla por un acueducto de 2.5 m de diámetro y 77 km de longitud, atravesando la Sierra de las Cruces, con un caudal de 4 m<sup>3</sup>/s. La segunda y tercera etapas, consistieron en la construcción de la planta potabilizadora "Los Berros" y del acueducto central, un túnel de 16 km de longitud paralelo al túnel Atarasquillo, denominado túnel Analco-San José. Estas dos etapas fueron las más difíciles, ya que implicaron bombear agua desde cotas muy bajas en relación con la planta potabilizadora. Así, el agua de la presa Colorines, la más baja respecto del Valle de México, debe ser elevada 1,100 m. Al agua de los Colorines se adicionan los caudales provenientes de las presas Tuxpan y del Bosque (localizadas en el Estado de Michoacán). Las tres etapas fueron diseñadas para aportar a la ZMCM un total de 19 m<sup>3</sup>/s; sin embargo, en la actualidad el aporte se ha estabilizado en 16 m<sup>3</sup>/s (Perló y González, 2005; Castelan, 2002). Del total que suministra el sistema Cutzamala, 6.4 m<sup>3</sup>/s son dirigidos a 11 municipios del Estado de México, es decir el 40% del total; y el resto 9.6 m<sup>3</sup>/s (60%) a 11 delegaciones del Distrito Federal.

Cabe mencionar que el Sistema Cutzamala, es uno de los sistemas de abastecimiento de agua potable más grandes del mundo, no solo por la cantidad de agua que suministra (16 m<sup>3</sup>/s), sino por el desnivel que vence (1100m). El sistema está integrado por siete presas derivadoras y de almacenamiento, 6 estaciones de bombeo y una planta potabilizadora denominada "Los Berros" (Tabla 1.1).

**Tabla 1.1 Características de los elementos que componen el Sistema Cutzamala**

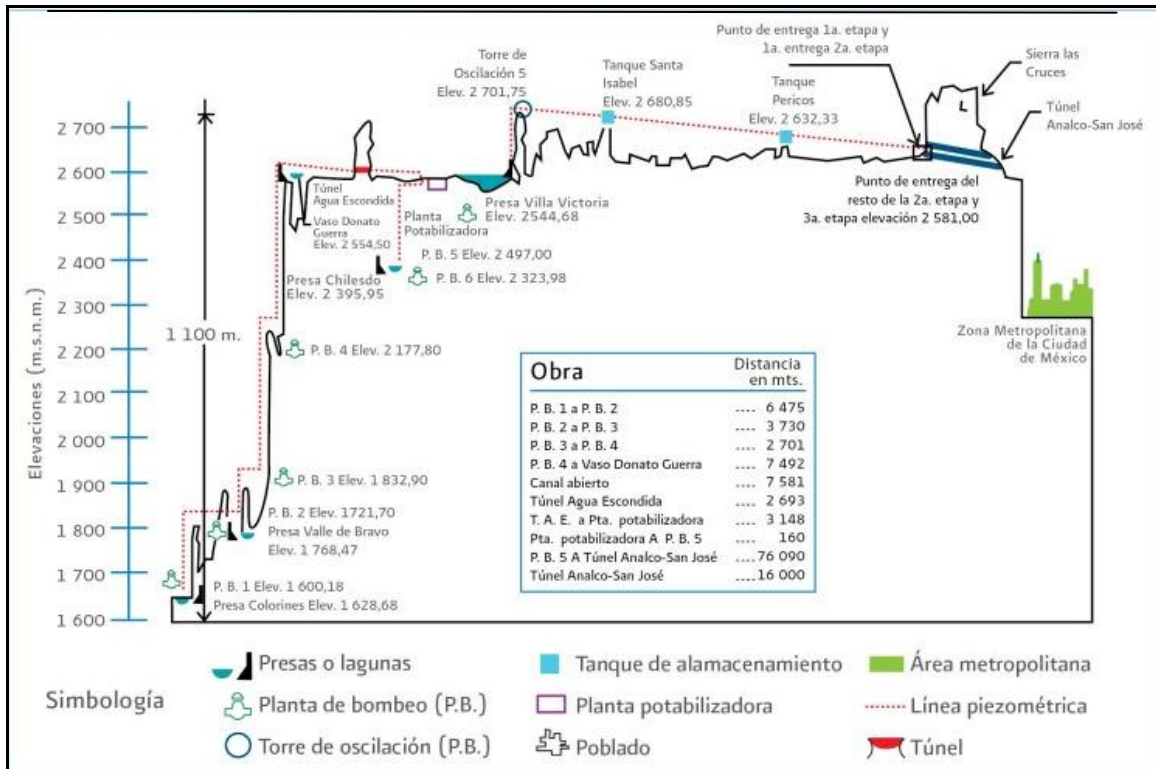
<b>ELEMENTO</b>	<b>TIPO</b>	<b>CAPACIDAD mil. m<sup>3</sup></b>	<b>ELEVACIÓN msnm</b>	<b>Diferencia de nivel con "Los Berros" (metros)</b>
Tuxpan	Presa Derivadora	5	1751	789
El Bosque	Presa de Almacenamiento	202	1741	799
Ixtapan del Oro	Presa Derivadora	0.5	1650	890
Colorines	Presa Derivadora	1.5	1629	911
Valle de Bravo	Presa de Almacenamiento	395	1768	772
Villa Victoria	Presa de Almacenamiento	186	2545	-
Chilesdo	Presa Derivadora	1.5	2396	144
Planta de Bombeo 1	Bombas	20	1600	940
Planta de Bombeo 2	Bombas	24	1722	818
Planta de Bombeo 3	Bombas	24	1833	707
Planta de Bombeo 4	Bombas	24	2179	361
Planta de Bombeo 5	Bombas	29.1	2497	43
Planta de Bombeo 6	Bombas	5.1	2324	216
Planta Potabilizadora Los Berros	Planta Potabilizadora	20	2540	-

msnm: Metros Sobre el Nivel del Mar

FUENTE: CONAGUA. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. 2008.

La Figura 1.2 muestra el nivel que se tiene que vencer (1100m) desde la parte más baja en la Planta de Bombeo No.1 para conducir el agua a la Torre de Oscilación No.5 y posteriormente conducirla por gravedad a la ZMCM.

**Figura 1.2 Perfil del Sistema Cutzamala**



FUENTE: CONAGUA. Organismo de Cuenca del Valle de México. Estadísticas de la Región XIII. Año2007.

### 1.1.3 Sistemas de potabilización del agua

El sistema de tratamiento que se emplea para la potabilización del agua depende de la fuente de donde provenga este recurso. El agua proveniente de las fuentes subterráneas es generalmente de buena calidad, y el agua de las fuentes superficiales no tanto, debido al contacto directo que tienen con el medio ambiente. En las fuentes subterráneas del Distrito Federal con la excepción de algunos pozos en el oriente de la ciudad, e incluyendo a los manantiales que afloran al poniente, la inyección de cloro es suficiente para asegurar su potabilización; a diferencia de las fuentes superficiales que requieren de plantas potabilizadoras con procesos físico químicos para asegurar la buena calidad del agua.

El agua que proviene de las fuentes externas Lerma y Cutzamala (sección 1.1.2.2) reciben tratamientos diferentes; así, el agua que proviene del Sistema Lerma (agua subterránea) es únicamente desinfectada y re-clorada a lo largo de su trayecto a la ZMCM y su distribución en la red de abastecimiento. El agua importada del sistema Cutzamala (agua superficial) es tratada en la planta potabilizadora Los Berros con un sistema convencional.

### **1.1.3.1 Sistema convencional**

#### **Planta potabilizadora Los Berros**

Esta planta forma parte del Sistema Cutzamala y su capacidad actual es de 16 m<sup>3</sup>/s de agua proveniente de las siete presas que lo abastecen: Tuxpan, El Bosque, Ixtapan del Oro, Colorines, Valle de Bravo, Villa Victoria y Chilesdo.

Su sistema de tratamiento comienza en el tanque de recepción de aguas crudas (figura 1.3) que tiene una capacidad de 6500 m<sup>3</sup>, donde en seguida, el agua es distribuida por cuatro canales. Cada canal (con una capacidad de 4 m<sup>3</sup>/s) consta de una rejilla, un dosificador de cloro y un medidor Parshall.



**Figura 1.3 Tanque de recepción de aguas crudas en la planta Los Berros**

Durante el trayecto que recorre el agua en los canales se dosifica como coagulante sulfato de aluminio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) con dosis entre 15 – 100 mg/L, el cual se

aplica en el agitador hidráulico del medidor Parshall (figura 1.4). Asimismo, en esta sección se lleva a cabo una pre-oxidación dosificando una solución de cloro con una concentración de 6 – 10 ppm.



**Figura 1.4 Medidores Parshall en la planta Los Berros**

El agua se conduce por gravedad a la sección de floculación (figura 1.5); el proceso utilizado en esta planta es la “floculación hidráulica”. Los tanques de floculación se dividen en secciones por unas mamparas en forma de laberinto, que promueven gradientes de velocidad entre 20 – 60 s<sup>-1</sup> a fin de inducir el movimiento del agua, y por ende, la total homogenización.



**Figura 1.5 Sección de floculación en la planta Los Berros**

Después del proceso de floculación, el agua pasa a la sección de sedimentación (figura 1.6). En esta sección hay una separación entre el agua y los flóculos formados en el paso anterior de floculación. La sección de sedimentación se

compone por cuatro tanques ( $1\text{m}^3/\text{s}$ ) con un tiempo de residencia de 1.2 h. La carga hidráulica es de  $228.5\text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ .



**Figura 1.6 Sección de sedimentación en la planta Los Berros**

Enseguida, el efluente de la sección de sedimentación pasa a los filtros de arena (silica). El paso de la filtración (figura 1.7) tiene el objetivo de eliminar el material sólido suspendido en el agua, reteniéndolo a través de una barrera física. La planta tiene ocho módulos de filtración (con una altura de cama de 1.35 m y tasa de filtración de  $240\text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ ). Los módulos son lavados cada 36 horas para remover los sólidos de la arena saturada.



**Figura 1.7 Filtración final en la planta Los Berros**

El agua filtrada se colecta en el tanque de aguas claras que provee a una planta de bombeo para su posterior distribución. Los lodos producidos (flóculos precipitados) en el paso de sedimentación son conducidos a los tanques de espesamiento de lodos (figura 1.8) donde se agrega un polímero, para después



transportar los lodos a presas. El agua recuperada en este paso se recircula al principio del proceso.



**Figura 1.8 Espesador de lodos en la planta Los Berros**

### **Planta potabilizadora Madín**

Entre las fuentes de abastecimiento superficial que abastecen la ZMCM se encuentra la presa Madín, que tiene la función de regular los caudales del río Tlalnepantla, en el Estado de México. Esta cuenca tiene una capacidad total de 24'700,000 m<sup>3</sup>, de los que una proporción (de 540 a 600 L/s) se bombea a la planta potabilizadora Madín y se distribuye a la red municipal. Los excedentes del agua no utilizada para los fines hidráulicos se conducen al interceptor Poniente, mezclándolos con las aguas del drenaje.

El agua cruda captada en la presa Madín es conducida hasta una caja amortiguadora (figura 1.9), con una capacidad de 14.5 m<sup>3</sup> de concreto reforzado que regula el volumen del agua que entra al sistema de potabilización.



**Figura 1.9 Caja amortiguadora en la planta Madín**

El agua es conducida a través de una canal Parshall en el que se mide el caudal que está pasando hacia los módulos (figura 1.10a). En esta etapa se dosifica tanto el coagulante sulfato de aluminio (con una concentración de 10 – 13%), como una solución de cloro para desinfectar y controlar el desarrollo de algas, en etapas posteriores del tratamiento. El coagulante se dosifica por medio de retromezcladores mecánicos (19 – 21 rpm) en una etapa de mezcla rápida posterior al canal Parshall (figura 1.10b).



**a) Canal Parshall**



**b) Mezclado rápido**

**Figura 1.10 Medición del caudal y adición del coagulante en la planta Madín**

El agua recién mezclada se conduce a los tanques de floculación (figura 1.11). Cada tanque tiene una capacidad de  $1264 \text{ m}^3$ . Esta etapa se lleva a cabo con flujo horizontal y una agitación lenta con paletas de madera (4 rpm).



**Figura 1.11 Tanque de floculación en la planta Madín**

La etapa siguiente corresponde a la sedimentación. El agua se hace circular a través de dos tanques de sedimentación con capacidad de 300 L/s cada uno (figura 1.12a). Dentro de los tanques se encuentra un sistema de canaletas recolectoras de sólidos (figura 1.12b).



**a) Tanques de sedimentación**

**b) Detalle de las canaletas dentro del tanque**

**Figura 1.12 Sistema de sedimentación rápida en la planta Madín**

Posterior a la sedimentación, el agua pasa por canales colectores que la envían hacia la sección de filtración (figura 1.13). Los filtros, seis en total, son de alta tasa con capacidad para 100 L/s cada uno. Los filtros están conformados por grava y un lecho de 80 cm de arena, con un falso fondo de losas con espreas ranuradas por donde pasa el agua.



a) Tanque de filtración



b) Batería de tanques de filtración

**Figura 1.13 Sección de filtración en la planta Madín**

Una vez filtrada el agua se le adiciona cal para neutralizar la corrosión propiciada por el exceso de coagulante. La última parte del tratamiento consiste en la adición de cloro (figura 1.14a) para llevar a cabo la desinfección y otorgar una protección residual al agua durante su distribución por la red. El agua clorada es almacenada en un tanque de concreto reforzado de 5000 m<sup>3</sup> de capacidad para su posterior distribución (figura 1.14b).



a) Sistema de cloración en gas



b) Agua potable almacenada

**Figura 1.14 Agua potable clorada y almacenada en la planta Madín**

### **1.1.3.2 Sistema avanzado**

Debido a la sobreexplotación de agua que ha sufrido el acuífero de la Ciudad de México, el agua extraída de la zona oriente de la ciudad presenta elevados niveles de contaminación. Cuando el agua a tratar tiene alta presencia y concentración de contaminantes, un sistema convencional no es suficiente para producir un agua con calidad potable. En estos casos, se utilizan los procesos avanzados de tratamiento.

A continuación se hará una descripción de los diferentes procesos que conforman el sistema avanzado de las plantas potabilizadoras Santa Catarina 10, Santa Catarina 13, El Sifón, Santa María Aztahuacán, Agrícola Oriental y Santa Cruz Meyehualco, todas ellas ubicadas en la delegación de Iztapalapa.

### **Desgasificación**

Este proceso tiene la finalidad de remover gases disueltos mediante una aireación forzada a contracorriente de la alimentación del agua. En estas torres



los anillos pall tienen la función de incrementar la transferencia de masa entre el disolvente (el agua) y el soluto (gas contaminante) (figura 1.15).



Agrícola Oriental



Santa Cruz Meyehualco



Santa María Aztahuacán

**Figura 1.15 Torres de desorción y/o degasificación en las plantas potabilizadoras avanzadas**

## Biofiltración

El agua en este proceso es bombeada con inyección de aire a contra corriente de tiro forzado, donde se lleva a cabo la remoción de nitrógeno amoniacal mediante la oxidación biológica. El bioreactor utiliza el crecimiento de biomasa en película fija para oxidar el nitrógeno amoniacal (figura 1.16).



Santa Catarina 13



Santa Catarina 10



El Sifón

**Figura 1.16 Torres de biofiltración en las plantas potabilizadoras avanzadas**

## Filtración

Es un proceso físico, para la separación de sólidos suspendidos y la materia coloidal de la fase líquida, mediante un material poroso. La filtración consiste en hacer pasar un líquido a través de un material poroso reteniendo la parte sólida (figura 1.17).



Santa Catarina 13



Santa María Aztahuacán



Agrícola Oriental

**Figura 1.17 Filtración a presión y a gravedad en las plantas potabilizadoras avanzadas**

## Oxidación con ozono

El objetivo de este proceso es oxidar el hierro y manganeso, eliminar cualquier coloración del agua y disminuir la demanda química de oxígeno. La oxidación de los metales es atribuida a los radicales  $\text{OH}^\cdot$  que se forman cuando el ozono se combina en el agua, estos metales a diferencia de la oxidación con hipoclorito de sodio se precipitan como óxido de hierro o manganeso. La demanda química de oxígeno es transformada por los mismos radicales  $\text{OH}^\cdot$  hasta  $\text{CO}_2$ . La remoción de color es atribuida a oxidación de la materia orgánica que está contenida en el agua, dicha materia es precipitada por los radicales  $\text{OH}^\cdot$  (figura 1.18).



**Santa Catarina 10**



**Agrícola Oriental**



**Figura 1.18 Tanque de contacto de ozono y generador de ozono en las plantas potabilizadoras avanzadas**

## **Adsorción**

Este proceso tiene como objetivo la remoción de color, olor y sabor del agua, así como la remoción de materia orgánica y el nitrógeno amoniacal. Este proceso consiste en la transferencia de un compuesto ya sea líquido o gaseoso hacia la superficie de una fase sólida (figura 1.19).



**Santa Catarina 10**



**Agrícola Oriental**



**Santa María Aztlahuacán**

**Figura 1.19 Torres de adsorción en las plantas potabilizadoras avanzadas**



## Ósmosis Inversa

La filtración por membranas tiene la finalidad de remover los sólidos disueltos totales y reducir la conductividad, o de una manera más general remover las sales disueltas en el agua. El funcionamiento de este sistema consiste en forzar el paso de un solvente a través de una membrana semipermeable, separando una solución de mayor concentración de una de menor concentración (figura 1.20).



**Figura 1.20 Equipos de ósmosis inversa en las plantas potabilizadoras avanzadas**

## Desinfección

Este último proceso permite la destrucción de los organismos patógenos mediante la adición de hipoclorito de sodio, el cual genera un residual que permite garantizar la desinfección durante el trayecto del agua a su destino final (figura 1.21).



**Agrícola oriental**



**Santa Catarina 10**

**Figura 1.21 Regulador y tanque de almacenamiento de hipoclorito de sodio en las plantas potabilizadoras avanzadas**

#### **1.1.4 Infraestructura para el suministro de agua potable**

El sistema de abastecimiento de agua potable se integra por las fuentes y las obras de infraestructura de captación, conducción, regulación y distribución al consumidor. De acuerdo al Plan Maestro de Agua Potable 1997-2010, para la Ciudad de México el sistema está compuesto por:

- a) Pozos.** Actualmente la profundidad de perforación de los pozos varía entre 50 y 400 m según la ubicación del acuífero. Los caudales de extracción se encuentran en un rango muy amplio que va de 10 l/s hasta 90 l/s.
  
- b) Manantiales.** Son el resultado de la recarga artificial y natural del acuífero elevando el nivel freático, dando por resultado que surjan fuentes brotantes. Para la ciudad de México se emplea agua de varios manantiales distribuidos al poniente y sur de la ciudad (Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras y Tlalpan).
  
- c) Acueductos y Líneas de conducción.** Sirven para comunicar y transportar el agua de las fuentes de abastecimiento con el sistema de

regulación y almacenamiento, sin que haya un suministro intermedio a los usuarios. Dentro de la Ciudad de México se cuenta con una infraestructura de 758 km de acueductos y líneas de conducción.

**d) Tanques de Almacenamiento y Regulación.** Estas estructuras alimentadas por los acueductos, se encargan de almacenar y regular los importantes caudales que se reciben generalmente de las fuentes externas al Valle de México. En la ciudad de México se cuenta con 380 tanques, con una capacidad global de 1,694,660 m<sup>3</sup>. De los cuales 360 tienen una capacidad menor a 5,000 m<sup>3</sup>, y únicamente 20 tanques son iguales o mayores a 50,000 m<sup>3</sup>.

**e) Plantas de Bombeo y Rebombeo.** Tienen como objetivo suministrar la energía para transferir el agua de un punto a otro. La Ciudad de México cuenta con 173 plantas de bombeo y rebombeo, con una capacidad instalada total de 40,202 L/s.

**f) Plantas Cloradoras y Potabilizadoras.** Son las encargadas de asegurar que el agua cumpla con las características estipuladas para la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, mediante su tratamiento a través de diferentes procesos.

**g) Redes de Distribución.** Es el sistema que se encarga de llevar el agua directamente al usuario. Según el diámetro, las redes se clasifican en primarias y secundarias. Las primarias tienen diámetros iguales o mayores a 508 mm (20''), en ellas no existen conexiones de tomas domiciliarias. La red secundaria está constituida por las tuberías de menor diámetro y en ellas se realizan las conexiones de las tomas domiciliarias. En la Ciudad de México se cuenta con 875 km de red primaria, y 11,953 km de red secundaria.

## **& FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

En este capítulo se hace una descripción general de los contaminantes emergentes, desde las fuentes que los originan hasta los procesos capaces de removerlos. En primer instancia, se presenta una definición característica de los contaminantes emergentes, la forma de incorporarse al ambiente y los riesgos a la salud humana que conllevan. En seguida, las distintas fuentes tanto de fármacos como de disruptores endocrinos en el ambiente. Por último, se habla tanto de la presencia de los contaminantes emergentes en las fuentes de suministro de agua potable, así como de los procesos para removerlos de las mismas, a partir de la revisión bibliográfica.

### **2.1 Contaminantes Emergentes**

Desde 1970, la evaluación del impacto de la contaminación por sustancias químicas se ha hecho con base en contaminantes prioritarios, especialmente aquellos referidos colectivamente como contaminantes “persistentes, bioacumulativos y tóxicos (PBT)”. De éstos, se conoce relativamente bien sobre las tecnologías para su remoción, y por tanto, se encuentran regulados por organismos e instituciones nacionales e internacionales. Sin embargo, éstos contaminantes corresponden a una pequeña porción de la larga lista de compuestos que aunque no han recibido la atención merecida, han estado presentes dañando el ambiente que nos rodea por diferentes medios (agua, suelo, aire, etc.) (Daughton y Ternes, 1999).

En las últimas décadas, una nueva gama de compuestos denominados “contaminantes emergentes” ha recibido especial atención. Éstos, en la mayoría de los casos corresponden a contaminantes no regulados, los cuales pueden ser candidatos a futuras regulaciones por sus efectos potenciales en la salud humana y en el ecosistema. Una característica de éstos compuestos es que no necesitan tener una alta persistencia para causar efectos negativos, debido a que su tasa

de transformación/remoción es compensada por la continua introducción en el ambiente. Los datos sobre su presencia, riesgo y ecotoxicidad aún son escasos, haciendo difícil predecir sus efectos en la salud de los seres humanos y organismos acuáticos (Barceló, 2003).

Los contaminantes emergentes se dividen en dos grandes grupos. En un grupo están los fármacos y los ingredientes activos de los productos del aseo personal. Ejemplos de éstos son los antibióticos de uso humano y veterinario, analgésicos, anti-inflamatorios, reguladores de lípidos,  $\beta$ -bloqueadores, fragancias, protectores solares, repelentes de insectos y antisépticos. Este grupo se define por las clases químicas y los tipos de usos para los que son fabricados. En el segundo grupo se encuentran los compuestos de disrupción endócrina, que se definen por el tipo de efecto biológico o mecanismos de acción en los organismos. Algunos ejemplos de disruptores endocrinos son los aditivos de gasolina, detergentes, plastificantes, hormonas y esteroides (Daughton, 2004). En la tabla 2.1 se presentan clases de contaminantes emergentes y algunos ejemplos de ellos.

**Tabla 2.1 Clases de contaminantes emergentes**

COMPUESTO	EJEMPLOS
<b>FÁRMACOS</b>	
Drogas de abuso	Anfetamina, cocaína, tetrahidrocanabinol
Antibióticos de uso humano y uso veterinario	Trimetoprim, eritromicina, lincomicina, sulfametaxozol
Analgésicos, anti-inflamatorios	Codeín, ibuprofeno, acetaminofen, ácido acetilsalicílico, diclofenaco, fenoprofeno, ketoprofeno
Medicamentos psiquiátricos	Diazepam
Reguladores de lípidos	Bezafibrato, ácido clofbrico, ácido fenofibrico, gemfibrozil
β-bloqueadores	Metropololo, propanolol, timolol
Medios de contraste para rayos X	Lopromida, iopamidol, diatrizoato
<b>PRODUCTOS PARA EL CUIDADO E HIGIENE PERSONAL</b>	
Fragancias	Almizcles nitro, policíclicos y macrocíclicos
Repelentes de insectos	N,N-dietiltoluamida
Antisépticos	Triclosán, Clorofeno
Protectores solares	Benzofenona, alcanfor metilbenceno
<b>DISRUPTORES ENDOCRINOS</b>	
Hormonas y esteroides	Estradiol, estrona, estriol, diestilstilbestrol
Retardantes de flama	C <sub>10</sub> -C <sub>13</sub> cloroalcanos, hexabromociclododecano, Ésteres difenil polibrominados (PBDEs), Bisfenol A tetrabromado, Tris (2-cloroetil) fosfatado
Aditivos de gasolina	Ésteres dialquil, metal-t-butil éter (MTBE)
Agentes y aditivos industriales	Agentes quelantes (EDTA), sulfonatos aromáticos, ésteres de ftalato
Surfactantes y sus metabolitos	Alquilfenoles etoxilados, 4-nonilfenoles, 4-octilfenol, Alquilfenoles carboxilados
Productos de desinfección	Lodo-THMs, bromoácidos, bromoacetnitrilos, bromoaldehídos, cianoformaldehído, bromato, NDMA

**FUENTE:** Farré et al., 2008

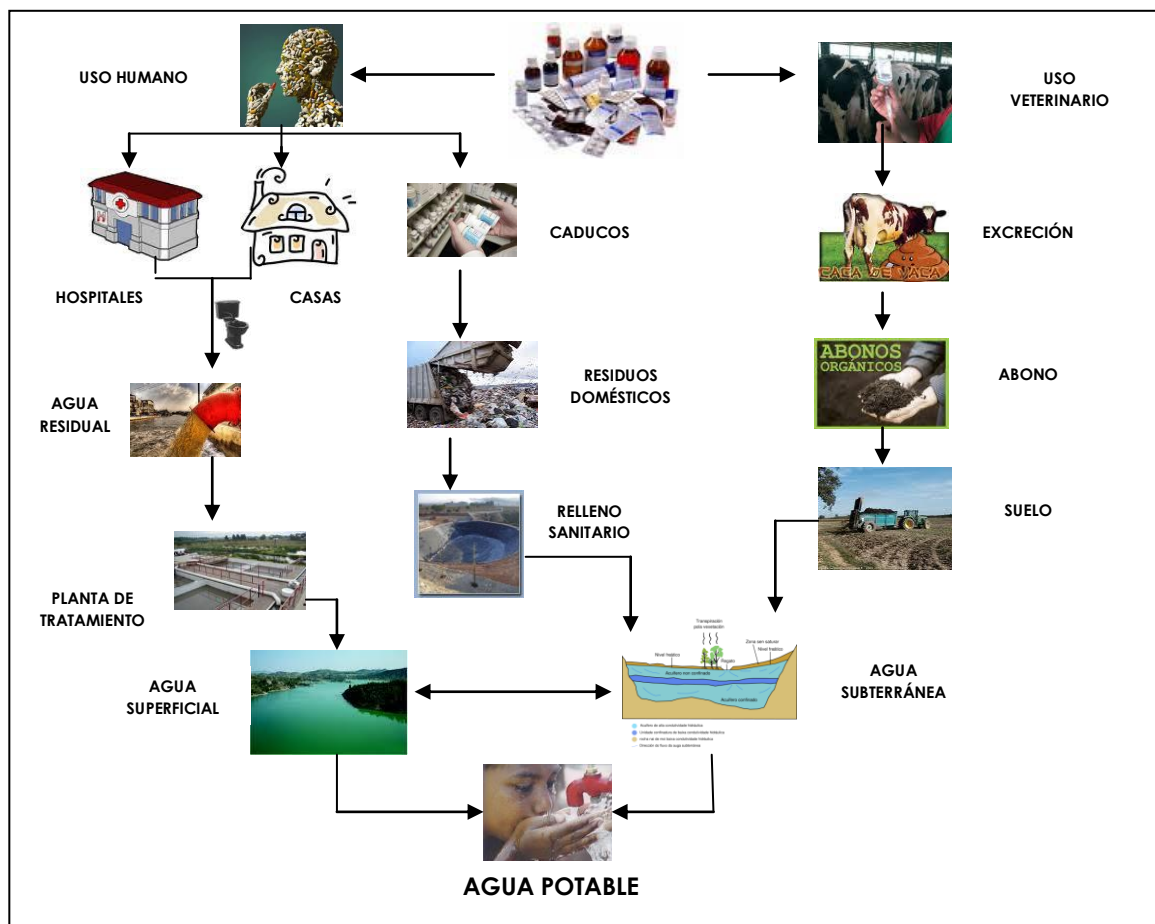
## **2.2 Fuentes de contaminantes emergentes**

### **2.2.1 Fármacos**

Los fármacos entran al ambiente a través de los mismos procesos de manufactura y los efluentes de agua residual que producen, por derrames accidentales, la inadecuada disposición de los medicamentos caducos, y principalmente, por consumo de los pacientes. Una vez que los fármacos son ingeridos, son metabolizados en el cuerpo humano en variados y distintos metabolitos o conjugados, los cuales pueden ser excretados junto con el ingrediente activo inalterado, por la orina o en las heces fecales. La transformación que pueden llegar a sufrir éstos compuestos depende de la adsorción, distribución, metabolismo y procesos de excreción del medicamento, así como de la salud del paciente (Kümmerer, 2004).

La figura 2.1 presenta de forma esquemática las fuentes y posibles rutas que siguen los fármacos incorporándose en el ambiente acuático. Los fármacos elaborados para uso humano son consumidos en los hospitales y en el hogar, metabolizados por el organismo, y excretados por la orina o heces fecales formando parte de las aguas residuales; éstas pueden ser conducidas hacia plantas de tratamiento, que actualmente al no estar diseñadas para la remoción de dichos compuestos, siguen estando presentes en el efluente que después es descargados en cuerpos de agua superficial. Aquellos fármacos que no fueron consumidos por su caducidad, en los hogares generalmente se desechan en los residuos domésticos que, en el mejor de los casos llegan a rellenos sanitarios, o bien, a tiraderos a cielo abierto donde el agua de lluvia se percola infiltrando una variedad de lixiviados contaminantes hacia el agua subterránea. Por otro lado, se encuentran aquellos fármacos para uso veterinario que una vez que son metabolizados por el ganado, lo excretan dando origen al abono que es utilizado en grandes superficies de suelo, y por ende, con su posible infiltración hacia el acuífero. Así pues, por medio de los cuerpos de agua superficial y del agua

subterránea, que son importantes fuentes de suministro de agua potable, se tiene un contacto cercano con los fármacos, tanto en el consumo directo de esta agua como en la preparación de los alimentos.



**Figura 2.1 Fuentes y rutas de la presencia de residuos fármacos en el ambiente acuático**

### 2.2.2 Disruptores endocrinos

Los disruptores endocrinos al ser un grupo tan grande y diverso, reúnen una amplia variedad de fuentes que los incorpora en el ambiente. Las principales fuentes son las descargas de origen industrial, doméstico y agrícola. Las primeras, incluyen efluentes industriales, accidentes (fugas de pipas o tanques) y agua de



lluvia que se infiltra y percola en los sitios de disposición de residuos sólidos que generan las mismas industrias. En las fuentes domésticas, el riesgo predominante lo constituyen las fosas sépticas, y los drenajes con sus posibles fugas. Asimismo, la disposición final que se haga de los residuos sólidos generados en el hogar en tiraderos a cielo abierto, o rellenos sanitarios en el mejor de los casos. Sin embargo, si dichos rellenos sanitarios no cumplen con las características esenciales para su buen funcionamiento, el agua de lluvia se puede percolar entre los residuos, para infiltrar los lixiviados hasta el agua subterránea. Finalmente, las fuentes agrícolas que son fuentes no puntuales, contribuyen con la introducción de los fertilizantes, herbicidas y pesticidas a los acuíferos por infiltración en el suelo, así como el riego con agua residual de grandes superficies de cultivos. De este modo, al formar parte del ambiente acuático, y al obtener de este las fuentes de suministro de agua potable, se tiene contacto directo con los contaminantes emergentes. Sin embargo, para el ser humano la fuente más importante de disruptores endocrinos, no es el agua sino los alimentos, a través de los compuestos utilizados para su preparación (Birkett y Llester, 2003).

### **2.3 Presencia de contaminantes emergentes en el ambiente acuático**

A la fecha es bien sabido que los productos farmacéuticos y del cuidado personal junto con los compuestos de disrupción endocrina, son contaminantes ubicuos de los efluentes de agua residual (Kim et al., 2007); estudios realizados en diferentes países confirman su presencia en esta matriz (Ternes, 1998; Carballa et al., 2004; Joss et al., 2005; Lee et al., 2008). Si bien, el agua residual es conducida hacia plantas de tratamiento, éstas actualmente no están diseñadas para la remoción de contaminantes emergentes, por lo que éstos compuestos siguen presentes en el efluente (Kolpin et al., 2002). Estos efluentes de agua residual, pueden contaminar las fuentes de suministro al ser descargados en los cuerpos de agua superficial (Huber et al., 2005), o bien, al ser utilizados para el riego de cultivos infiltrándose por el suelo hasta llegar al acuífero, y por ende, al agua

subterránea. En el Anexo A, se presenta una extensa revisión bibliográfica de las concentraciones encontradas de contaminantes emergentes en agua superficial, subterránea y potable, en diferentes países.

### **2.3.1 Agua superficial**

A pesar de las complicaciones que conlleva la detección de concentraciones de contaminantes emergentes por debajo de  $\mu\text{g/L}$ , el rápido desarrollo de técnicas analíticas ha revelado que muchos cuerpos de agua están contaminados con diversos compuestos de disrupción endocrina (Kim, et al., 2008). Estudios recientes han demostrado que las plantas de tratamiento de agua residual que actualmente operan con procesos convencionales (coagulación, floculación y sedimentación) no son efectivas para la eliminación de contaminantes emergentes, mostrando porcentajes de remoción muy bajos que dependen de las características del agua residual, las condiciones climáticas, y el diseño y operación de los procesos del tratamiento (Boyd et al., 2003). Los efluentes de agua residual provenientes de la actividad industrial, agrícola o áreas densamente pobladas son importantes fuentes tanto puntuales como difusas en los cuerpos de agua superficial (Kuster et al., 2008). La frecuente presencia de contaminantes emergentes en estos cuerpos de agua, algunos de los cuales son utilizados como fuente de suministro de agua, da lugar a la preocupación acerca del potencial que tienen éstos compuestos en el agua potable, y de este modo afectar la salud humana a través de una exposición crónica (Stackelberg et al., 2004).

### **2.3.1 Agua subterránea**

Se considera que las fuentes de agua subterránea presentan mejor calidad que las fuentes de agua superficial, prevaleciendo la idea errónea de que los acuíferos se encuentran protegidos de manera natural de las diversas fuentes de contaminación. Sin embargo, a partir de los años setenta, se ha registrado la

presencia de contaminantes de origen municipal, industrial y agrícola en agua subterránea con una tasa alarmante de incremento (Cherry, 1984). Actualmente la presencia de contaminantes emergentes en agua subterránea no ha sido la excepción. Algunos estudios realizados en agua subterránea extraída por medio de pozos (Sacher et al., 2001; Silva-Castro, 2007) confirman la presencia de fármacos y compuestos de disrupción endócrina en éstas fuentes de agua. La cuantificación de contaminantes emergentes en agua subterránea ha sido todo un reto para el desarrollo de técnicas analíticas, debido a las mínimas concentraciones en que se llegan a encontrar en muchas ocasiones por debajo del límite de detección (Wicks et al., 2004). Esto se debe a la atenuación natural que los contaminantes pueden tener durante su transporte a través de la subsuperficie, interactuando en su paso con las partículas del suelo, adsorbiéndolos y removiéndolos del agua (Kümmerer, 2004).

## **2.4 Mecanismos de atenuación natural de contaminantes emergentes en el agua**

Una vez que los contaminantes emergentes son liberados al ambiente en sus diferentes medios (agua, suelo, aire y sedimentos), están expuestos a procesos naturales de atenuación que reducen su concentración y presencia. La suma de estos mecanismos puede representar un proceso de tratamiento aplicable como un sistema de reúso de agua potable (Drewes et al., 2002).

### **2.4.1 Biodegradación**

La principal vía de degradación de los contaminantes emergentes en el ambiente acuático es la biodegradación por los microorganismos nativos del agua residual. Las plantas de tratamiento de aguas residuales con sistemas de tratamiento biológico son capaces de remover parcialmente algunos contaminantes emergentes (Carballa et al., 2004; Joss et al., 2006; Nasu et al.,

2001). La biodegradación se realiza por procesos de reacción mediados por la actividad microbiana. En los procesos aerobios, los microorganismos pueden transformar moléculas orgánicas vía la sucesión de reacciones de oxidación a productos más simples como por ejemplo otro tipo de moléculas mineralizadas o incluso hasta la molécula de CO<sub>2</sub>. En la biodegradación las bacterias crecen al emplear como fuente de alimento y energía a los contaminantes, utilizando las enzimas producidas para biodegradarlos, y como resultado, durante la biotransformación, las bacterias producen metabolitos (Van der Meer et al., 2006; Rittmann y McCarty, 2001).

#### **2.4.2 Fotodegradación**

La fotodegradación es un proceso abiótico capaz de degradar los contaminantes emergentes en el ambiente. En este proceso se generan rompimientos de los enlaces en las moléculas de los contaminantes por la acción de los rayos ultravioleta del sol. El grado de fotodegradación de los contaminantes emergentes puede variar dependiendo del compuesto sometido a la luz ultravioleta, la intensidad de la misma, así como de los componentes de la solución acuosa (ácidos húmicos y fúlvicos) y sus características fisicoquímicas de (pH, carbón orgánico total) (Doll et al., 2003). En los cuerpos de agua con gran cantidad de material sólido suspendido el nivel de penetración de la luz solar es muy bajo, no obstante se ha demostrado que la fotólisis puede llevarse a cabo de manera eficiente en la parte superficial de los cuerpos de agua (Xia et al., 2004). Algunos estudios muestran la eficiente fotodegradación que algunos contaminantes emergentes pueden llegar a tener en distintos cuerpos de agua (Hans-Rudolf et al., 1998; Tixier et al., 2003; Lorient et al., 2006).

#### **2.4.3 Sorción**

La sorción representa el principal fenómeno de retención de los contaminantes emergentes en el ambiente acuático. Este proceso ocurre principalmente vía

mecanismos de absorción y adsorción. La absorción involucra las interacciones hidrofóbicas entre las moléculas del compuesto y de la matriz; y la adsorción tiene lugar debido a las interacciones electrostáticas entre los grupos funcionales de los compuestos y la matriz. La remoción de contaminantes por adsorción a los sedimentos y/o material suspendido presentan resultados ambientales diferentes. La adsorción por sedimentos permite una contaminación permanente de la fuente, al impedir la rápida degradación aerobia y la distribución en el cuerpo de agua de los contaminantes, aprisionándolos en el fondo por varias décadas; mientras que la adsorción por el material suspendido puede remover permanentemente los contaminantes del área de captación, pero pueden depositarse en los lagos y océanos, por lo que la turbulencia podría re-suspender y transportar el material sedimentado propiciando la aireación necesaria para su rápida degradación (Cirja et al., 2007).

## **2.5 Diferentes tecnologías para la remoción de contaminantes emergentes en agua potable**

La mayoría de los contaminantes emergentes muestran impactos adversos en el ambiente acuático (Farré et al., 2008), por lo que las instituciones gubernamentales encargadas de regular su destino y comportamiento, desde las últimas dos décadas están llevando a cabo una evaluación más cuidadosa del rendimiento de la remoción de estos compuestos, en los procesos de las plantas de tratamiento de agua potable (Westerhoff, 2005). Afortunadamente, estudios recientes han mostrado que procesos tales como la ozonación, la adsorción en carbón activado y las membranas de nanofiltración/ósmosis inversa, pueden remover eficientemente un número relativamente grande de fármacos, aunque a un elevado costo (Huber, 2005). Así pues, algunos procesos de tratamiento para agua potable son más efectivos que otros para reducir la concentración de un amplio intervalo de contaminantes. Los procesos convencionales de coagulación, floculación y sedimentación, son en gran medida ineficaces para

remover contaminantes orgánicos disueltos (Boyd et al., 2003). Los procesos oxidativos tales como la cloración y ozonación, son efectivos para reducir las concentraciones de varios de ellos, dando por resultado la reacción y transformación de éstos compuestos a otros más fáciles de degradar; sin embargo, su eficacia es función de la estructura del contaminante y de la dosis del oxidante. Los procesos biológicos, tales como lodos activados, biofiltración, y el tratamiento SAT (sistema de tratamiento natural suelo-acuífero), reducen significativamente la concentración de compuestos que son biodegradables y/o fácilmente ligados a partículas (Kümmerer, 2004). El carbón activado puede remover casi todos los contaminantes orgánicos; sin embargo, su capacidad de remoción está limitada por el tiempo de contacto, la competencia con la materia orgánica natural, la solubilidad del contaminante, y el tipo de carbón (EPA, 2001). La osmosis inversa (OI) y las membranas de nanofiltración (NF) proporcionan barreras de rechazo efectivas, mientras que la microfiltración y las membranas de ultrafiltración (UF) proporcionan una remoción selectiva para contaminantes con propiedades específicas (Kim, 2007).

En la Tabla 2.3 se muestran porcentajes de eficiencia de remoción de algunos contaminantes emergentes en diferentes procesos de tratamiento de agua potable.

**Tabla 2.2 Remoción (%) de contaminantes emergentes mediante diferentes tecnologías.**

COMPUESTO	INFLUENTE (Concentración)	TRATAMIENTO/PROCESO (Concentración efluente)	% REMOCIÓN
Ibuprofeno	Lago Paldang, Seúl, Corea del Sur ( 25 ng/L)	Coag. - UF - GAC <sup>(1)</sup> ( 28 ) - ( 38 ) - ( <10 ng/L)	93
DEHF	Presa en Beijing, Miyun ( 23 µg/L )	AC/O <sub>3</sub> -BAC <sup>(2)</sup> ( 1.51 µg/L )	93.4
Bisfenol A		Sistema híbrido <sup>(3)</sup> NF – O.C.H	
Bisfenol A		Modificación secuencial de membrana de NF de poliamida <sup>(4)</sup>	de 74.1% a 96.9%
Ibuprofeno			de 98.1% a 99.7%
Ac. salicílico			de 97% a 99.1%
Ac. clofíbrico		Uso de soluciones cargadas en la combinación NF – GAC <sup>(5)</sup>	>98
Diclofenaco			>98
Gemfibrozil			>98
Ibuprofeno			>98
Ketoprofeno			>98
Diclofenaco		PAC; O. Cloro; O. Ozono <sup>(6)</sup>	39; 95; 95
Estradiol			84; 99; 98
Estrona			76; 99; 99
Etinilestradiol			77; 99; 99
Gemfibrozil			37; 99; 98
Ibuprofeno			16; 75; 80
Naproxeno			52; 95; 91
Triclosán			89; 99; 92

<sup>(1)</sup> Kim et al., 2007; <sup>(2)</sup> Li et al., 2006; <sup>(3)</sup> Kim et al., 2008b; <sup>(4)</sup> Kim et al., 2008a; <sup>(5)</sup> Verliefe et al., 2007a; <sup>(6)</sup> Westerhoff et al., 2005

Coag: coagulación; UF: ultrafiltración; GAC: carbón activado granular; AC/O<sub>3</sub>-BAC: ozonación con carbón activado biológico; NF: nanofiltración; O.C.H.: oxidación catalítica homogénea; PAC: carbón activado en polvo; O. cloro: oxidación con cloro; O. ozono: oxidación con ozono;

### **3. METODOLOGÍA**

En el siguiente capítulo se describe la metodología experimental realizada para el desarrollo del presente trabajo. En primer instancia, se presentan los criterios establecidos para la selección de los contaminantes emergentes por evaluar. En seguida, los sitios seleccionados para llevar a cabo el muestreo, considerando el tipo de fuente de abastecimiento y la población suministrada. Y por último, el procedimiento para el muestreo y su análisis de laboratorio.

#### **3.1 Selección de los Contaminantes Emergentes**

Los contaminantes emergentes por estudiar fueron seleccionados con base en tres criterios: (a) la posible presencia de contaminantes emergentes en las fuentes de abastecimiento a partir de revisión bibliográfica, b) los riesgos a la salud de cada compuesto, y c) la capacidad analítica disponible en el laboratorio del Instituto de Ingeniería. La Tabla 3.1 presenta la selección de los contaminantes emergentes que reunieron los criterios antes mencionados.



**Tabla 3.1 Criterios de selección de contaminantes emergentes**

COMPUESTOS	ESTUDIOS DE SU PRESENCIA						RIESGOS A LA SALUD	CAPACIDAD ANALÍTICA
	1	2	3	4	5	6		
Ácido clofíbrico					x		x	X
Ácido salicílico				x			X	X
Bisfenol-A		x		x		x	X	X
DEHF				x			X	X
Diclofenaco							X	X
Estradiol				x		X	X	X
Estrona				x		X	X	X
Etinilestradiol						X	X	X
Gemfibrozil		x					X	X
Ibuprofeno		x	x	x			X	X
Ketoprofeno							X	X
Naproxeno	x			x			X	X
Nonilfenoles				x		x	X	X
Pentaclorofenol		X					X	X
Triclosán		x		x			X	X
2,4-D							x	x

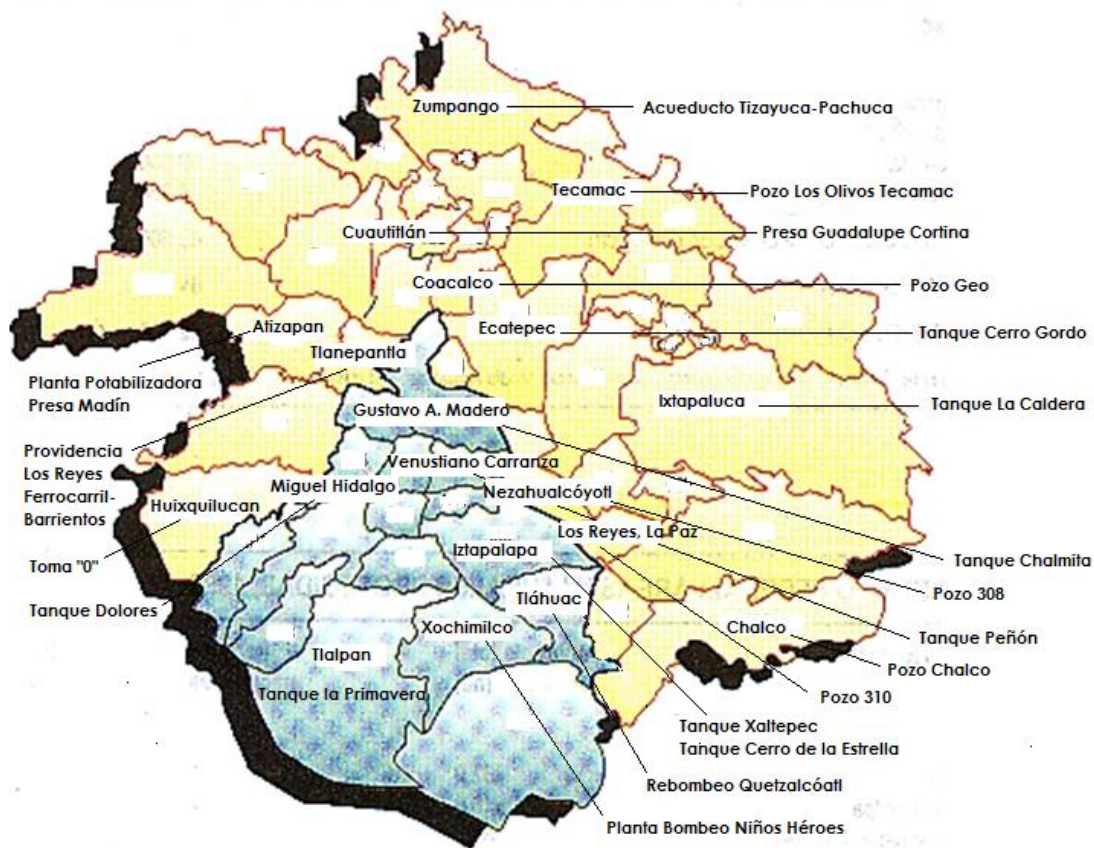
<sup>1</sup>Boyd et al., 2003; <sup>2</sup> Stackelberg et al., 2004; <sup>3</sup> Kim et al., 2007;

<sup>4</sup> Silva-Castro, 2008; <sup>5</sup> Ternes, 1998; <sup>6</sup> Campbell, 2006; <sup>7</sup> Gibson R. et al., 2007

### 3.2 Selección de los sitios de muestreo

Dado que la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se abastece de diversas fuentes de suministro (internas y externas) de agua, descritas en el capítulo 1.1.2, se seleccionaron sitios de muestreo de manera que se logre abarcar la mayor superficie y población de la ZMCM.

La figura 3.1 presenta la localización geográfica de los puntos, mostrando como de manera representativa se logra cubrir la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.



**Figura 3.1 Ubicación de los sitios de muestreo**

La tabla 3.2 indica los sitios muestreados con su clasificación por fuente y tipo, y el número de habitantes que abastecen de agua. De este modo, se muestra que la zona en estudio comprende un 64% de la población total de la ZMCM.

**Tabla 3.2 Sitios muestreados por caracterización de tipo de fuentes de suministro y población que abastecen de agua en la ZMCM**

FUENTES	SISTEMA	TIPO	SITIOS MUESTREADOS	EDO.	No. HAB. ABASTECE
INTERNAS	Sistema del Acuífero del Valle de México	Subterránea	Po. Geo	EM	30,000
			Po. Coyotepec	EM	30,000
			Po. Tultitlán	EM	30,000
			T. Cerro Gordo Reyes	EM	125,000
			T. Chalmita	DF	315,000
			T. Santa Isabel de Tola	DF	37,000
			T. Quetzalcoatl	DF	40,000
			T. Xaltepec	DF	320,000
			T. Cerro de la Estrella	DF	1,119,500
			Po. 310	EM	50,000
			Po. Chalco	EM	30,000
			Po. 308	EM	50,000
			Po. Los Olivos	EM	33,000
			T. La Caldera	EM	362,000
			T. Santa Catarina	DF	300,000
			T. Peñón	DF	685,000
			PP. Santa Catarina 10	DF	27,000
			PP. Santa Catarina 13	DF	25,000
			PP. Sta. Cruz Meyehyalco	DF	30,000
		PP. Agrícola Oriental	DF	27,500	
PP. Sta. María Aztahuacán	DF	23,000			
PP. El Sifón	DF	30,000			
		Superficial	PP. Madín	EM	250,000
EXTERNAS	Sistema Cutzamala	Superficial	Pr. Villa Victoria	EM	-
			Pr. Valle de Bravo	EM	-
			Pr. Guadalupe	EM	-
			Pr. El Bosque	MICH	-
			PP. Los Berros	DF	3,000,000
				EM	2,000,000
			T. Toma 0	EM	30,000
			T. Cerro Gordo Cutzamala	EM	550,000
			T. Cerro Gordo Mezcla	EM	-
			T. Primavera	DF	467,500
		Sistema Lerma	Subterránea	T. Dolores	DF
			T. Caída del Borracho	DF	1,625,000
<b>Población abastecida de agua por los sitios muestreados</b>					<b>11,680,000</b>
Población total de la ZMCM					18,304,579
<b>Población que se cubre en el estudio</b>					<b>64%</b>

EDO: estado; EM: Estado de México; DF: Distrito Federal; Po: pozo; T: tanque; PP: planta potabilizadora; Pr: presa

### 3.3 Muestreo y análisis

Se consideraron dos campañas de monitoreo. La primera, se realizó en periodo de lluvias y comprendió los meses de mayo a agosto de 2008. La segunda, se realizó en el periodo de estiaje abarcando los meses de enero a junio de 2009. Estas dos campañas de monitoreo se realizaron para determinar variaciones estacionales en las fuentes de suministro.

Las muestras se tomaron por triplicado en cada sitio. En los pozos, tanques y presas (figura 3.2), se determinaron los contaminantes emergentes en estudio. Para evaluar la remoción de dichos contaminantes en algunos sistemas de potabilización, las muestras se tomaron en el influente y efluente de los mismos.



**a) Presa el Bosque (Michoacán)**

**b) Pozo Tultitlán (E.M.)**

**Figura 3.2 Toma de muestra en presa y pozo**

En cada sitio, la toma de muestra se realizó en puntos donde se tuviera acceso al agua. Cabe mencionar que en algunos lugares (por ejemplo los tanques), la toma de muestra no es tan práctica, por lo que se utilizan cuerdas y cubetas (figura 3.3). La muestra de agua se toma previa a la cloración debido a que el cloro es un compuesto altamente oxidante, y reacciona con los analitos interfiriendo en el estudio de los mismos (Jiménez, 2008).



**a) Planta potabilizadora Agrícola Oriental (Iztapalapa, D.F.)**



**b) Tanque Peñón (Venustiano Carranza, D.F.)**



**Figura 3.3 Toma de muestra a) con obra de toma, b) sin obra de toma**

Las muestras se tomaron en frascos de vidrio color ámbar de 4L, y se transportaron en seguida en hieleras hacia el laboratorio (figura 3.4), donde se almacenaron en el cuarto frío a 4°C hasta su extracción al día siguiente.



**Figura 3.4 Transporte de muestras**

La metodología analítica para el análisis de las muestras, se describe con detalle en el Anexo B, y fue desarrollada por Gibson y col., 2007, en el Instituto de Ingeniería, UNAM. A grandes rasgos, ésta técnica comprende la extracción en fase sólida en cartuchos Oasis HLB, donde los extractos obtenidos fueron separados en dos fases mediante elución. Por un lado, la fase que contiene a los fármacos de carácter ácido, y por otro lado, la fase que contiene los compuestos de disrupción endócrina. En seguida, las muestras fueron derivatizadas, para finalmente ser analizadas mediante un sistema acoplado de análisis de cromatografía de gases con espectrometría de masas.

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Este capítulo se divide en tres secciones. En la primera, se presentan las concentraciones encontradas de contaminantes emergentes en fuentes de abastecimiento de agua, de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. El análisis de datos se organizó en pozos, presas y tanques. Asimismo, se hace una comparación por separado del periodo de lluvia y del de estiaje. La segunda sección, muestra la comparación de la concentración de contaminantes emergentes en el agua residual, con lo encontrado en las fuentes de agua. En la tercera se presentan datos de remoción de estos compuestos en sistemas de potabilización.

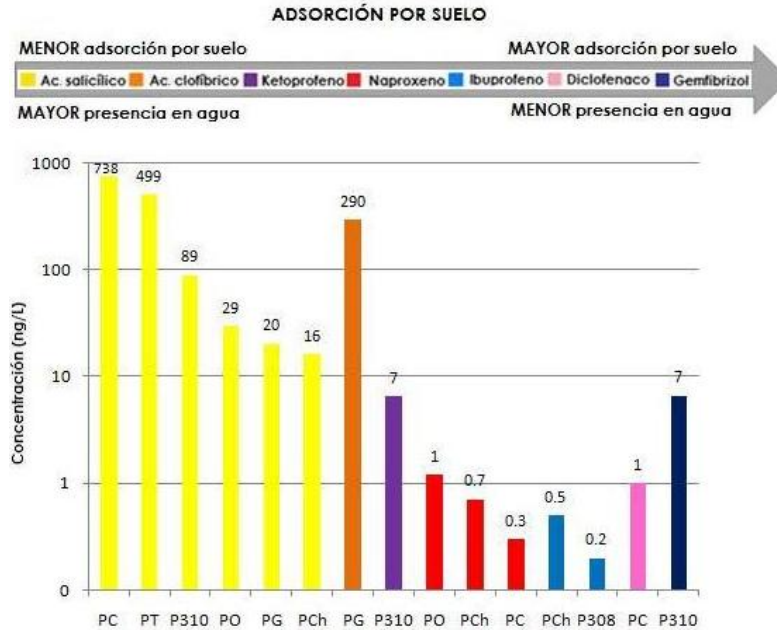
### **4.1 Presencia de contaminantes emergentes en las fuentes de abastecimiento**

En esta sección se analiza la presencia de los contaminantes emergentes seleccionados (fármacos y disruptores endocrinos) en las distintas fuentes de abastecimiento monitoreadas.

#### **4.1.1 Fármacos**

##### **4.1.1.1 Pozos**

La figura 4.1 muestra las concentraciones de fármacos detectadas en periodo de estiaje, en pozos que abastecen al norte y este de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Los compuestos están ordenados en forma creciente en cuanto a su tendencia a la adsorción en suelo, y por ende, a su decreciente capacidad para ser detectados en agua subterránea.



PC: pozo Coyotepec; PT: pozo Tultitlán; P310: pozo 310; PO: pozo Los Olivos; PG: pozo Geo; PCh: pozo Chalco; P308: pozo 308

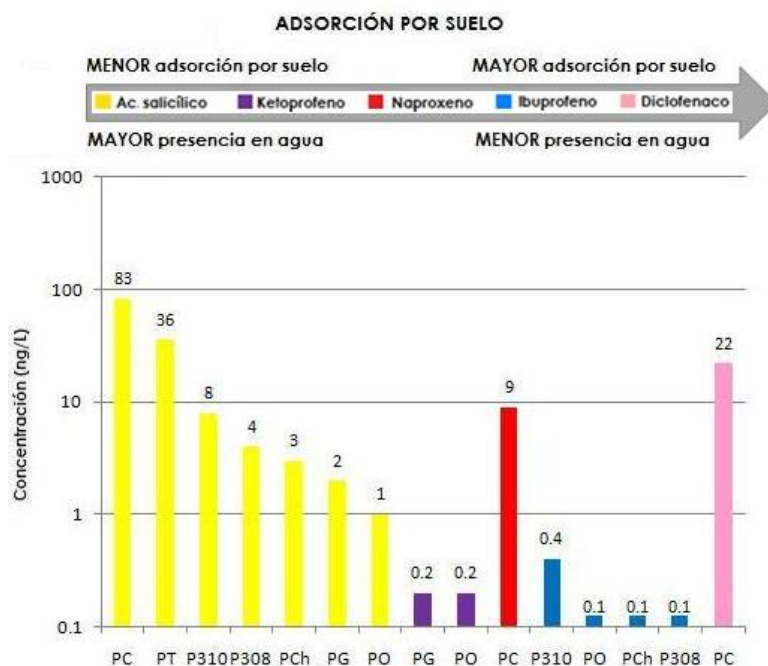
**Figura 4.1 Concentraciones de fármacos en agua de pozos de la ZMCM en periodo de estiaje y su relación con la capacidad de adsorción por suelo**

En periodo de estiaje se detectaron todos los fármacos seleccionados en el estudio. La presencia y concentración de éstos, siguió una tendencia decreciente debido a su mayor capacidad por adsorción en suelo. Así, el ácido salicílico se encontró en la concentración más alta y además, con una mayor presencia en pozos. Este comportamiento responde a la forma aniónica de la molécula del ácido salicílico que por ser un ácido orgánico es débilmente adsorbido en la mayoría de suelos (Nicholls y Evans, 1991). Otros estudios (Barcelo *et al.*, 1996; Heberer *et al.*, 1998; Wade *et al.*, 1998) muestran que es común detectar ácidos débiles en aguas subterráneas. Además la figura 4.1, muestra que el ácido clofibríco y el ketoprofeno se detectaron sólo en un pozo (pozo geo y pozo 310, respectivamente). El ácido clofibríco presentó una concentración de 290 ng/L, la cual podría atribuirse a su alta movilidad en el ambiente acuático (Hans – Rudolf, 1998b). Del lado derecho de la gráfica, se presentan los fármacos con menor probabilidad de estar presentes en agua. Así, se detectó naproxeno en tres pozos (con concentraciones de 0.3 ng/L a 1.0 ng/L), e ibuprofeno en dos pozos (con



concentraciones de 0.2 ng/L y 0.5 ng/L). Por último, diclofenaco y gemfibrozil se detectaron en un pozo (pozo Coyotepec y pozo 310, respectivamente), y sus concentraciones no siguieron el patrón de comportamiento establecido de acuerdo con su posibilidad de adsorción por el suelo. Algunos estudios (Drewes, 2002; Huang, 2004) realizados en un sistema de tratamiento natural suelo-acuífero muestran que naproxeno, ibuprofeno, diclofenaco y gemfibrozil son fácilmente removidos durante la infiltración. Los procesos principales que intervienen en ello son la biodegradación y la adsorción (Ruetsch, 2000).

En la figura 4.2 se presentan las concentraciones de fármacos en pozos que abastecen al este y norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, en periodo de lluvia. De la misma forma que en el caso anterior, los fármacos están ordenados en forma creciente en cuanto a su capacidad de adsorción en el suelo.



PC: pozo Coyotepec; PT: pozo Tultitlán; P310: pozo 310; PO: pozo Los Olivos; PG: pozo Geo; PCh: pozo Chalco; P308: pozo 308

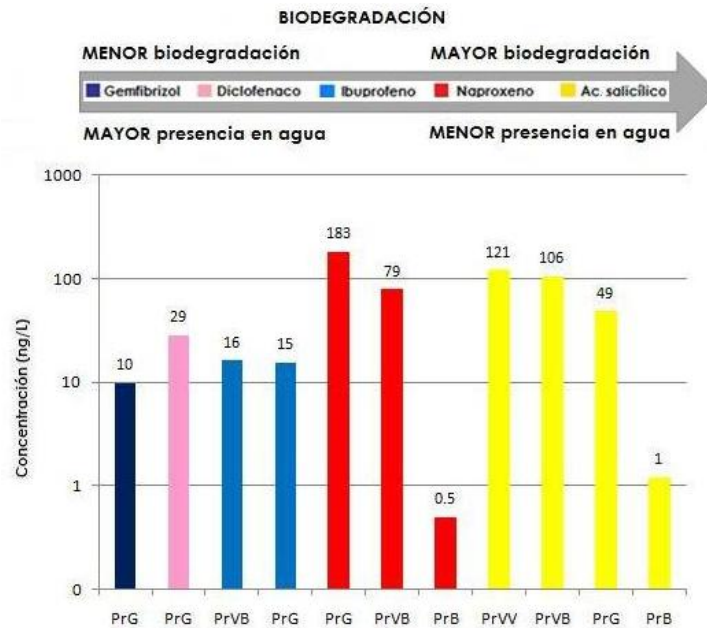
**Figura 4.2 Concentraciones de fármacos en agua de pozos de la ZMCM en periodo de lluvia y su relación con la capacidad de adsorción por suelo**



Las concentraciones encontradas de los fármacos resultaron menores en periodo de lluvia que de estiaje; esto probablemente debido a la dilución con agua de lluvia. De izquierda a derecha (figura 4.2), los fármacos siguen la tendencia decreciente en cuanto a su posible presencia en agua. En primer lugar, se presenta el ácido salicílico con la mayor incidencia en pozos, así como con las mayores concentraciones (1 ng/L a 83 ng/L). Esto es debido a la baja adsorción de los ácidos orgánicos débiles en suelo (Dubus et al., 2001). En seguida, se encuentran ketoprofeno (0.2 ng/L) e ibuprofeno (0.1 ng/L) que tienen una alta capacidad de adsorción en sedimentos (Scheytt et al., 2005). Destacan naproxeno y diclofenaco, que sólo se detectaron en el pozo Coyotepec en concentraciones considerables (9 ng/L y 22 ng/L, respectivamente). Cabe mencionar que el diclofenaco, también fue el único fármaco detectado en este mismo pozo para periodo de estiaje. Ello podría indicar una posible fuente de agua residual doméstica muy cercana al pozo Coyotepec, ya que no sólo se encuentra un compuesto de alta adsorción en suelo, sino que además se encuentran otros fármacos; es decir, que al no seguir el patrón de alta adsorción por suelo y menor presencia en agua según las características del fármaco, es probable exista la afectación del pozo por una fuente de contaminación externa. Experimentos en columnas diseñadas para simular bancos de infiltración muestran que el diclofenaco es muy resistente a la biotransformación; a pesar de que eventualmente llega a ser degradado (Mersmann et al., 2003).

#### **4.1.1.2 Presas**

En la figura 4.3 se muestran las concentraciones de fármacos en agua de presas que abastecen al Sistema Cutzamala. Los compuestos están ordenados en forma creciente respecto de su biodegradabilidad, y por ende, a su decreciente probabilidad de ser detectados en agua superficial.



PrG: presa Guadalupe; PrVB: presa Valle de Bravo; PrB: presa El Bosque; PrVV: presa Villa Victoria

**Figura 4.3 Concentraciones de fármacos en agua de presas que abastecen el sistema Cutzamala y su relación con la capacidad de biodegradabilidad**

Los resultados no muestran algún patrón definido de comportamiento, como en el caso de los pozos. Ello posiblemente se debe a que los cuerpos de agua superficial reciben muchas descargas de agua puntuales y no puntuales. A pesar de ello, en términos generales se observa que aunque son pocos los compuestos detectados, las concentraciones son mayores que las encontradas en pozos.

Lorien *et al.* (2006), mostraron la disminución de las concentraciones de gemfibrozil, ibuprofeno y naproxeno de un 60% hasta un 90% en el agua de un río, concluyendo que la biotransformación tuvo mayor influencia que la fotólisis. Aunado a esto, ibuprofeno presenta coeficientes relativamente altos de adsorción en partículas, por lo que los contaminantes se remueven por sedimentación (Tixier *et al.*, 2003). Diclofenaco sólo fue detectado en un sitio (presa Guadalupe), probablemente por ser un compuesto altamente fotodegradable. La literatura señala que más del 90% de la concentración de diclofenaco puede ser reducida por degradación fotolítica en agua superficial

(Hans-Rudolf *et al.*, 1998<sup>a</sup>; Kummerer, 2004; Tixier *et al.*, 2003). En la figura 4.3, también se puede apreciar que en la presa Guadalupe (PrG) se encuentra mayor presencia de fármacos (los cinco detectados en presas), así como la mayor concentración de naproxeno (183 ng/L), lo que muestra una mayor vulnerabilidad de esta presa a descargas difusas y/o puntuales de contaminación.

#### 4.1.1.3 Tanques

Para entender los resultados de esta sección, es necesario recordar que los tanques almacenan agua proveniente de las distintas fuentes de abastecimiento (pozos, presas, plantas potabilizadoras). Por lo que en realidad lo que se tiene es una mezcla de agua de diversos orígenes.

La figura 4.4 presenta los fármacos detectados en agua de tanques de almacenamiento de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México en periodo de estiaje. Los compuestos están ordenados en forma decreciente respecto de su solubilidad en agua.

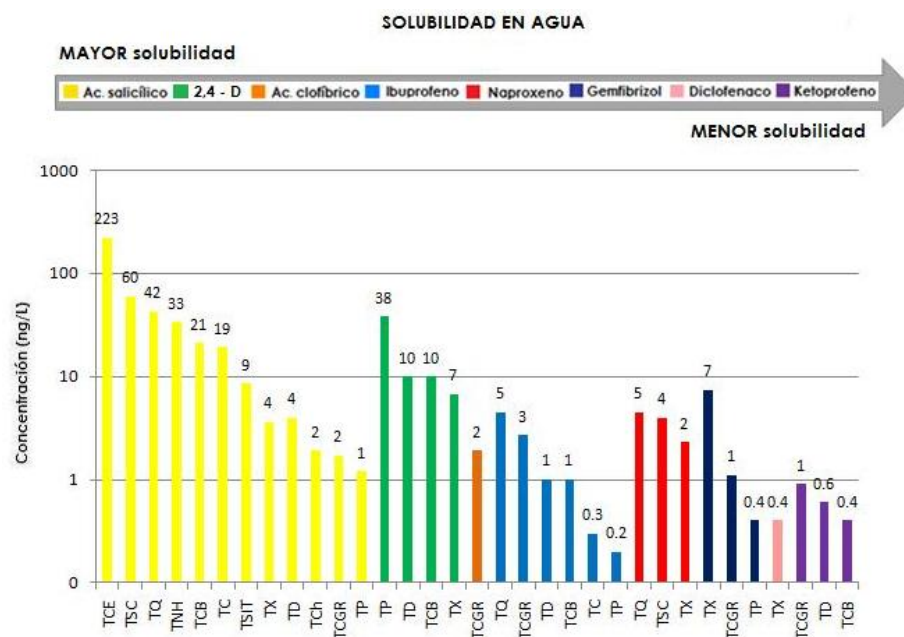


**TC:** tanque La Caldera; **TCGR:** tanque Cerro Gordo Los Reyes; **TSC:** tanques Santa Catarina; **TQ:** tanque Quetzalcoátl; **TX:** tanque Xaltepec; **TSIT:** tanque Santa Isabel de Tola;

**Figura 4.4 Concentraciones de fármacos en agua de tanques de la ZMCM en periodo de estiaje y su relación con la solubilidad en agua**

Por su alta polaridad el ácido salicílico tiene una mayor presencia tanto en términos de presencia como de concentración. Las concentraciones detectadas para ácido salicílico en agua de tanques son menores a las encontradas en pozos (figura 4.1) para el periodo de estiaje, muy probablemente por la dilución al combinar el agua proveniente de diferentes fuentes. Del mismo modo, el resto de los fármacos se detectan en menor presencia y concentración.

En la figura 4.5, se presentan las concentraciones de fármacos y ácidos detectadas en el agua de los tanques de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México en periodo de lluvias. Los compuestos están nuevamente ordenados en forma decreciente con respecto a su solubilidad en agua.



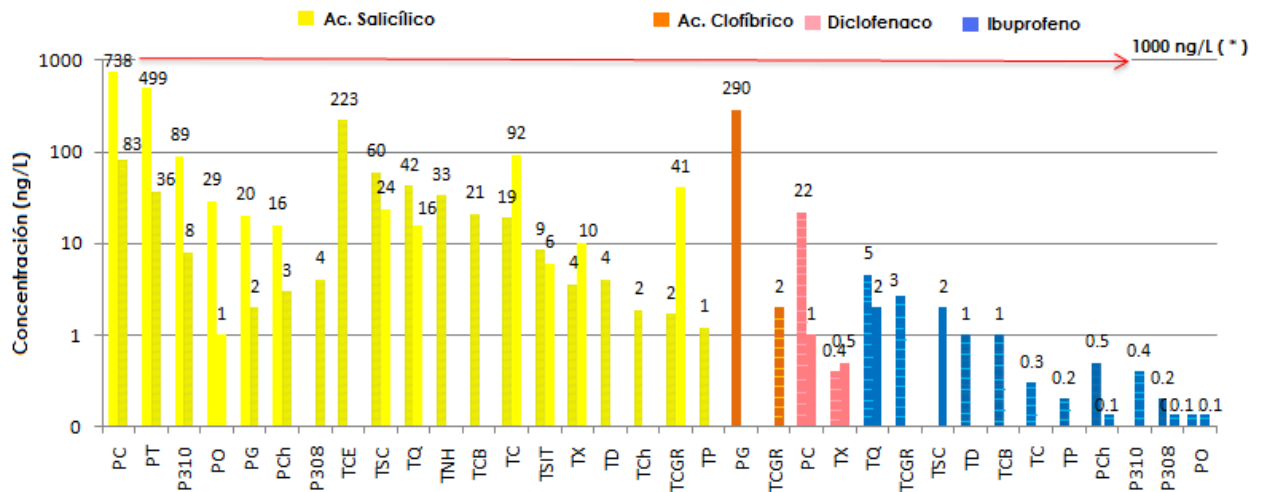
**TCE:** tanque Cerro de la Estrella; **TSC:** tanques Santa Catarina; **TQ:** tanque Quetzalcoátl; **TNH:** tanque Niños Héroes; **TCB:** tanque Caída del Borracho; **TC:** tanque La Caldera; **TSIT:** tanque Santa Isabel de Tola; **TX:** tanque Xaltepec; **TD:** tanque Dolores; **TCh:** tanque Chalco; **TCGR:** tanque Cerro Gordo Los Reyes; **TP:** tanque Peñón

**Figura 4.5 Concentraciones de fármacos y ácidos en agua de tanques de la ZMCM en periodo de lluvia y su relación con la solubilidad en agua**

De forma general para todos los compuestos detectados, se encuentra un considerable aumento en presencia y concentración con respecto de la temporada de estiaje (figura 4.4); esto posiblemente porque las precipitaciones acarrean más fármacos a las fuentes de abastecimiento. Vale la pena resaltar que en periodo de lluvia, el ácido salicílico se detectó en el agua de los doce tanques monitoreados. Por otro lado, el 2,4-ácido diclorofenoxiacético (2,4-D) solo fue detectado en periodo de lluvia en el tanque Xaltepec, el cual se encuentra en el sur de la Ciudad de México donde hay presencia de zonas agrícolas.

#### **4.1.1.4 Límites provisionales en agua potable**

Los fármacos son compuestos candidatos de futura regulación en el ambiente acuático, por lo que no existen límites oficiales de su concentración en agua potable. Sin embargo, diversos autores han planteado límites provisionales para evaluar la importancia del riesgo potencial a la salud humana de la presencia de algunos compuestos en el medio ambiente. El cálculo de éstos criterios provisionales involucraron parámetros de naturaleza toxicológica y farmacológica, el destino y transporte ambiental de cada fármaco, y la valoración de la exposición humana al agua contaminada (Schulman et al., 2002; Webb, 2001; Cleuvers, 2003; Kümerer, 2004). La figura 4.6 muestra el límite provisional establecido de 1000 ng/L para agua potable de ácido salicílico, ácido clofíbrico, diclofenaco e ibuprofeno. Las concentraciones detectadas de estos fármacos en el agua de pozos y tanques estuvieron por debajo del límite establecido.



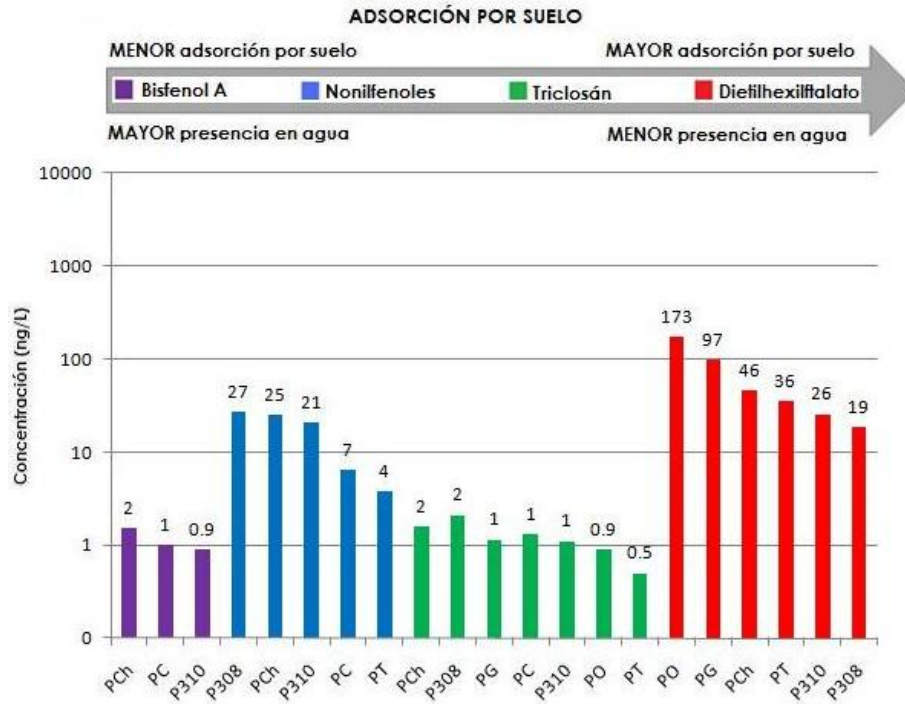
**TCE:** tanque Cerro de la Estrella; **TSC:** tanques Santa Catarina; **TQ:** tanque Quetzalcoátl; **TNH:** tanque Niños Héroes; **TCB:** tanque Caída del Borracho; **TC:** tanque La Caldera; **TSIT:** tanque Santa Isabel de Tola; **TX:** tanque Xaltepec; **TD:** tanque Dolores; **TCh:** tanque Chalco; **TCGR:** tanque Cerro Gordo Los Reyes; **TP:** tanque Peñón; **PC:** pozo Coyotepec; **PT:** pozo Tultitlán; **P310:** pozo 310; **PO:** pozo Los Olivos; **PG:** pozo Geo; **PCh:** pozo Chalco; **P308:** pozo 308; (\*)Schulman et al., 2002; Webb, 2001; Cleuvers, 2003; Kümerer, 2004

**Figura 4.6 Límites provisionales para ácido salicílico, ácido clofibrico, diclofenaco e ibuprofeno en agua potable**

## 4.1.2 Disruptores endocrinos

### 4.1.2.1 Pozos

En la figura 4.7 se presentan las concentraciones encontradas de disruptores endocrinos en pozos que abastecen al norte y este de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) para estiaje. Los compuestos están ordenados en forma creciente en cuanto a su tendencia a la adsorción en suelo, y al mismo tiempo, en cuanto a su posible decreciente presencia en agua subterránea.



PCh: pozo Chalco; PC: pozo Coyotepec; P310: pozo 310; P308: pozo 308; PT: pozo Tultitlán; PG: pozo Geo; PO: pozo Los Olivos

**Figura 4.7 Concentraciones de disruptores endocrinos en agua de pozos de la ZMCM en periodo de estiaje y su relación con la capacidad de adsorción por suelo**

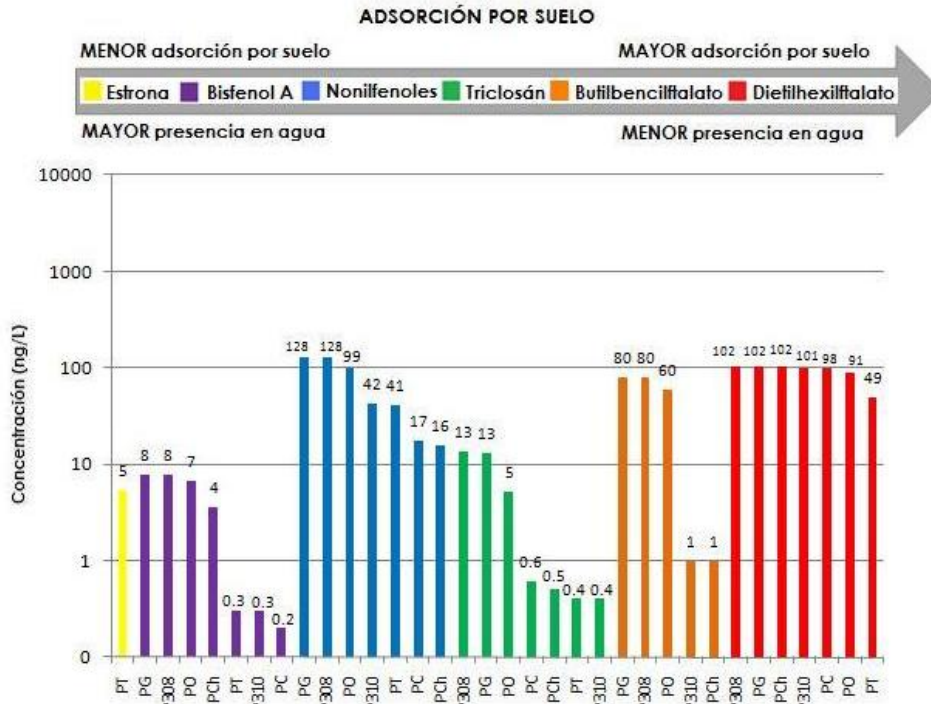
En el lado izquierdo de la gráfica (figura 4.7), se esperaría una mayor presencia y concentración de Bisfenol A ya que tiene los menores coeficientes tanto de adsorción en sedimentos como de biodegradabilidad en el material del acuífero (Ying *et al.*, 2003); sin embargo, se detecta con poca presencia (en tres de los siete pozos monitoreados) y bajas concentraciones (de 0.9 ng/L a 2 ng/L). Zeng *et al.* (2006), determinaron que bisfenol A presenta mayor adsorción en sedimentos y menor solubilidad en agua cuando existe un aumento de concentración iónica. Lo que podría explicar las bajas concentraciones de bisfenol A en los pozos Chalco y 310 localizados en la zona este del acuífero de la ZMCM, y que por la sobre explotación presenta concentraciones elevadas de iones hierro y manganeso. Asimismo, estudios previos demuestran la rápida disipación de bisfenol A por medio de su degradación y adsorción en diferentes matrices de

suelo, señalándolo como un compuesto con bajo potencial para contaminar agua subterránea (Fent *et al.*, 2003). Además en la figura 4.6, se observa que los nonilfenoles tienen mayor presencia en agua (con concentraciones medias alrededor de 17 ng/L), a comparación del triclosán el cual se detecta en concentraciones menores de alrededor de 1 ng/L. La detección de concentraciones moderadas de nonilfenoles se atribuye a su elevado coeficiente de adsorción en sedimentos y de biodegradabilidad (Ying *et al.*, 2003; Llorca-Porcel *et al.*, 2009). Por otro lado, las bajas concentraciones de triclosán en agua pueden deberse a su naturaleza hidrofóbica (Ying *et al.*, 2007).

En cuanto al disruptor endocrino dietilhexilftalato (DEHP), se presentó éste con concentraciones mayores (de 19 ng/L a 173 ng/L) a las del resto de los compuestos. Sin embargo, esta situación era de esperarse debido a la ubicuidad del compuesto en el ambiente por su creciente producción. En el año 2006, se estimó una producción mundial aproximada de 1 millón de toneladas de DEHP, al utilizarlo en la fabricación de policloruro de vinilo (PVC) (Dargnat *et al.*, 2009). Este PVC es el plástico con el que se fabrican desde tuberías hasta botellas de agua mineral.

En la figura 4.8 se presentan las concentraciones de disruptores endocrinos en los pozos que abastecen al norte y este de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, en periodo de lluvia. Los compuestos nuevamente están ordenados en cuanto a su decreciente probabilidad de ser detectados en agua.





PT: pozo Tultitlán; PG: pozo Geo; P308: pozo 308; PO: pozo Los Olivos; PCh: pozo Chalco; P310: pozo 310; PC: pozo Coyotepec;

**Figura 4.8 Concentraciones de disruptores endocrinos en agua de pozos de la ZMCM en periodo de lluvia y su relación con la capacidad de adsorción por suelo**

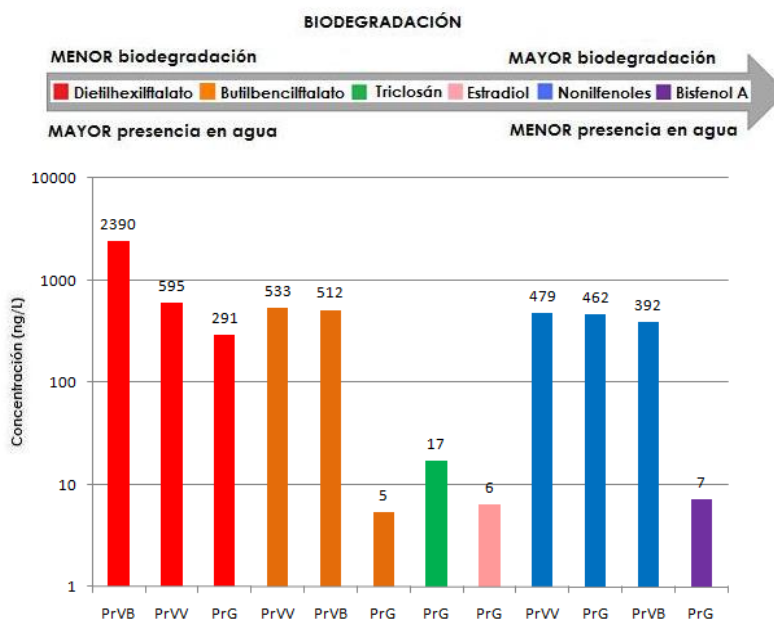
Los disruptores endocrinos siguen la misma tendencia de adsorción en suelo en periodo de estiaje y de lluvia (figura 4.7 y 4.8, respectivamente). Sin embargo, tres observaciones marcan la diferencia para periodo de lluvia: las concentraciones superiores de los compuestos, la novedosa presencia de butilbencilftalato (BuBeF) (detectado en cinco de los siete pozos monitoreados) con una máxima concentración de 80 ng/L, y la presencia de estrona (con una concentración de 5 ng/L) en el pozo Tultitlán.

Entre las diversas fuentes de compuestos de disrupción endócrina en el ambiente, se encuentran la deposición atmosférica, las aguas residuales domésticas e industriales, y la escorrentía urbana (Dargnat *et al.*, 2009), todas ellas susceptibles de ser afectadas por las precipitaciones que acarrearán con más disruptores

endocrinos a las fuentes. La imprevista detección de BuBeF en temporada de lluvia, podría deberse a las altas presiones de vapor de los ftalatos (BuBeF, DEHP) que los volatilizan hacia la atmósfera atrapándolos en masas de nubes, para después incorporarlos al ambiente acuático por precipitación (Dargnat *et al.*, 2009). El hecho de encontrar estrona solo en un sitio (pozo Tultitlán) puede deberse a la elevada adsorción que presentan los estrógenos en partículas (desde un 80% hasta un 99%), y el bajo porcentaje (< 20%) que se encuentra disuelto (Carballa *et al.*, 2008).

#### 4.1.2.2 Presas

En la figura 4.9 se muestran las concentraciones de disruptores endocrinos en presas que abastecen al Sistema Cutzamala. Los compuestos están ordenados en forma creciente, con respecto a su biodegradabilidad, y por ende, a su decreciente probabilidad de ser detectados en cuerpos de agua superficial.



PrB: presa El Bosque; PrVB: presa Valle de Bravo; PrVV: presa Villa Victoria; PrG: presa Guadalupe;

**Figura 4.9 Concentraciones de disruptores endocrinos en agua de presas que abastecen el sistema Cutzamala y su relación con la capacidad de biodegradabilidad**

Las concentraciones de disruptores endocrinos en presas son superiores a las encontradas en pozos (figuras 4.7 y 4.8), lo que muestra la mayor contaminación a la que están expuestas. En el lado izquierdo de la figura 4.8, donde se presentan los disruptores endocrinos con menor biodegradabilidad, están dietilhexilftalato (DEHP) y butilbencilftalato (BuBeF) con concentraciones que disminuyen desde cerca de 1000 ng/L hasta 500 ng/L. A pesar de que los ftalatos (DEHP, BuBeF) tienen baja solubilidad en agua, se pueden incorporar en material particulado por adsorción, y depositarse así en los sedimentos (Yuan *et al.*, 2002; Huang *et al.*, 2008), lo que los hace más persistentes en los cuerpos de agua superficial. En la figura 4.9 se muestran en seguida de los ftalatos y con menor concentración los compuestos fenólicos. Por un lado, los nonilfenoles tienen una concentración promedio de 400 ng/L, y por otro lado, bisfenol A con una baja concentración de 7 ng/L. El estudio realizado por Staples *et al.*, (2000), muestra que el Bisfenol A es un compuesto fácilmente biodegradable en cuerpos de agua receptores de descargas de agua residual industrial.

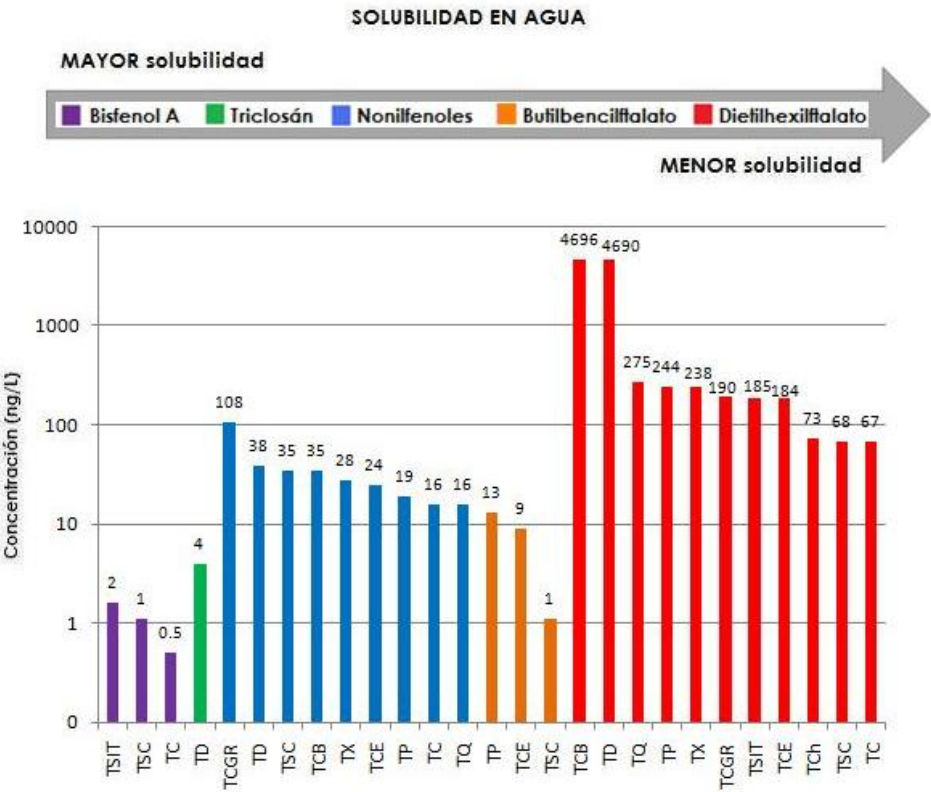
Al centro de la figura 4.9 se presentan el triclosan con una baja concentración de 17 ng/L, y que no sigue con la tendencia decreciente por biodegradación. Estudios previos muestran que el triclosan puede ser reducido hasta en un 80% en cuerpos de agua superficial (Tixier *et al.*, 2002) siendo el principal proceso de remoción la fototransformación por irradiación solar (Singer *et al.*, 2002).

Por último, el estradiol se presenta solo en la presa Guadalupe con una baja concentración de 6 ng/L. Los estrógenos naturales pueden presentar una potencial y rápida degradación, en ríos que incluso reciben considerables cantidades de residuos urbanos (Jurgens *et al.*, 2002; Cargouet *et al.*, 2004).

#### **4.1.2.3 Tanques**

Para entender los resultados de esta sección, es necesario recordar que los tanques almacenan agua proveniente de las distintas fuentes de abastecimiento (pozos, presas, plantas potabilizadoras).

La figura 4.10 presenta los disruptores endocrinos detectados en agua de tanques de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, en periodo de estiaje. Los compuestos están ordenados en forma decreciente en relación de su solubilidad en agua.



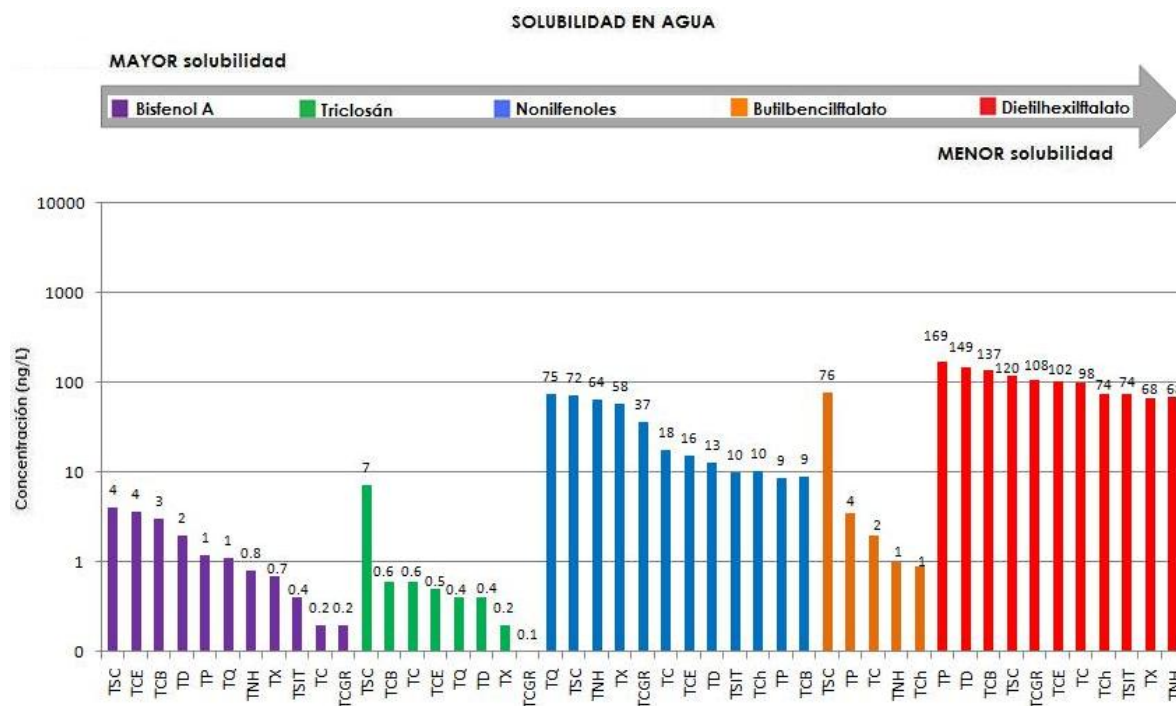
**TSIT:** tanque Santa Isabel de Tola; **TSC:** tanques Santa Catarina; **TC:** tanque La Caldera; **TD:** tanque Dolores; **TCGR:** tanque Cerro Gordo Los Reyes; **TCB:** tanque Caída del Borracho; **TX:** tanque Xaltepec; **TCE:** tanque Cerro de la Estrella; **TQ:** tanque Quetzalcoátl; **TP:** tanque Peñón; **TCh:** tanque Chalco;

**Figura 4.10 Concentraciones de disruptores endocrinos en agua de tanques de la ZMCM en periodo de estiaje y su relación con su solubilidad en agua**

Comparando los resultados de la figura 4.10, con los resultados obtenidos en pozos para el mismo periodo de estiaje (figura 4.6), se observa que la presencia de bisfenol A es similar en tanques y pozos. Triclosán sólo se detectó en un tanque (tanque Dolores), probablemente porque la combinación de agua que se lleva a cabo en los tanques favorezca la naturaleza hidrofóbica del compuesto (Ying et

al., 2007). Los disruptores endocrinos nonilfenoles y dietilhexilftalato (DEHP), muestran mayor presencia y concentración en los tanques con concentraciones máximas alrededor de 100 ng/L y 4000 ng/L, respectivamente; lo que podría atribuirse a posibles fuentes de agua residual industrial muy cercanas a los tanques.

La figura 4.11 presenta los disruptores endocrinos detectados en agua de tanques de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), en periodo de lluvia. Los compuestos están ordenados en forma decreciente con respecto a su solubilidad en agua.



**TSC:** tanques Santa Catarina; **TCE:** tanque Cerro de la Estrella; **TCB:** tanque Caída del Borracho; **TD:** tanque Dolores; **TP:** tanque Peñón; **TQ:** tanque Quetzalcoált; **TNH:** tanque Niños Héroes; **TX:** tanque Xaltepec; **TSIT:** tanque Santa Isabel de Tola; **TC:** tanque La Caldera; **TCGR:** tanque Cerro Gordo Los Reyes; **TCh:** tanque Chalco;

**Figura 4.11 Concentraciones de disruptores endocrinos en agua de tanques de la ZMCM en periodo de lluvias y su relación con la solubilidad en agua**

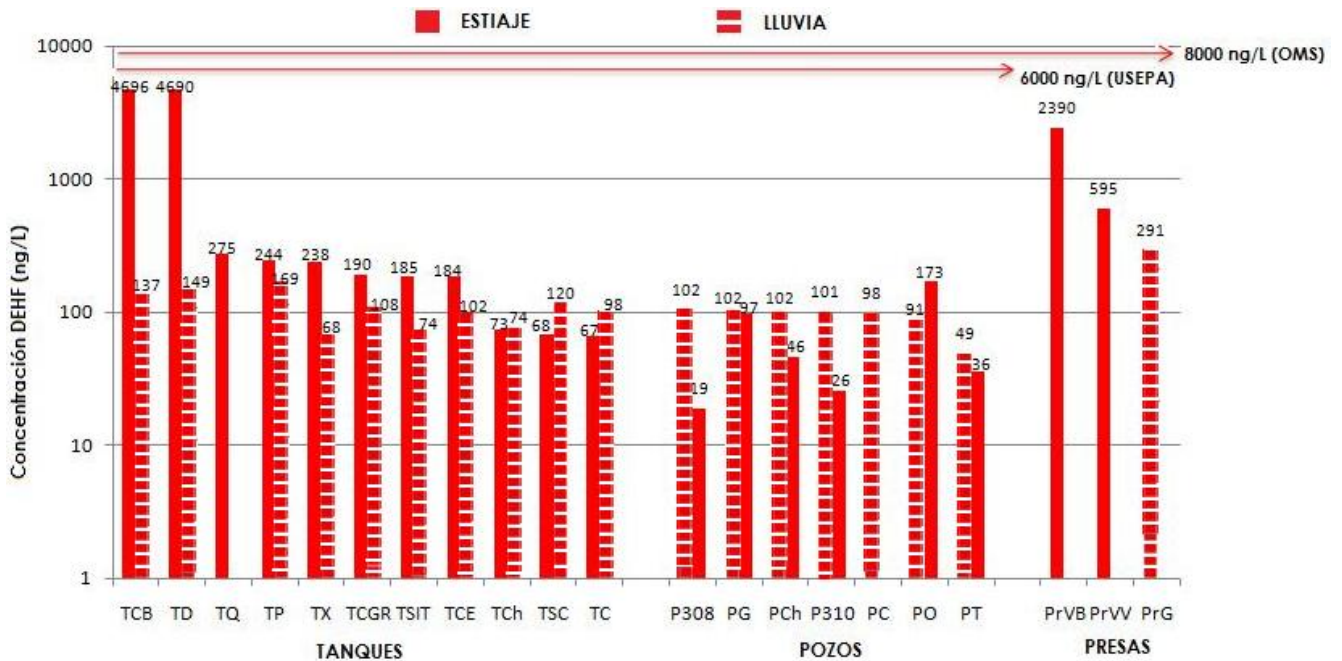
La abundancia de disruptores endocrinos en tanques es mayor en periodo de lluvias, que de estiaje (figura 4.9). Bisfenol A, nonilfenoles y dietilhexilftalato (DEHP)

se detectaron en agua de los once tanques monitoreados. Sin embargo, la concentración promedio de DEHP es menor en periodo de lluvia (100 ng/L) que de estiaje (1000 ng/L). Lo anterior probablemente debido a la dilución con agua de lluvia.

Por otro lado, comparando la figura 4.11 con los resultados obtenidos en pozos en el mismo periodo de lluvia (figura 4.8), se observan dos escenarios distintos. En los pozos se encontraron concentraciones mayores, con menor presencia de compuestos; y en los tanques concentraciones menores, con mayor presencia de compuestos. Lo anterior podría explicarse para los tanques por medio de la combinación de agua proveniente de diferentes fuentes, acarreando más contaminantes pero diluyendo sus concentraciones. Y para los pozos, se explica mediante la posible saturación de contaminantes que puede llegar a experimentar el suelo, reduciendo su capacidad de adsorción y permitiendo el paso de concentraciones considerables hacia el acuífero.

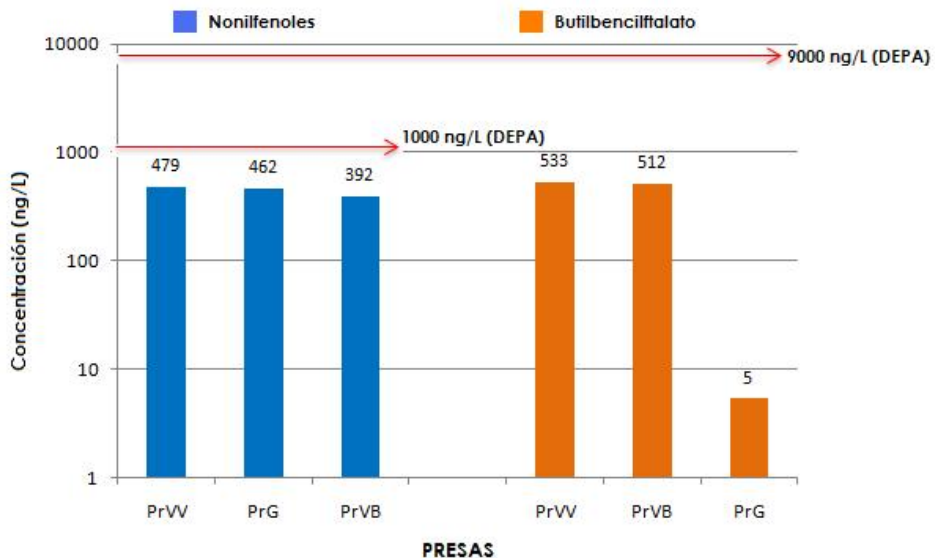
#### **4.1.2.4 Normatividad internacional en agua superficial y potable**

Los contaminantes emergentes de mayor preocupación son aquellos compuestos de disrupción endócrina que ya están presentando efectos potenciales en organismos acuáticos (Farré *et al.*, 2008). Para algunos de éstos disruptores endocrinos existe normatividad internacional que los regula. La figura 4.12 muestra los límites establecidos para dietilhexilftalato (DEHF) en agua potable y agua superficial. The United States Environmental Protection Agency (USEPA) establece una concentración límite de 6000 ng/L en agua potable, la cual no se rebasa ni en los tanques ni en los pozos monitoreados de donde se distribuye el agua a los domicilios. La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece una concentración límite de 8000 ng/L en agua superficial, que tampoco se rebasa en las presas monitoreadas.



**Figura 4.12 Límites establecidos para dietilhexilftalato (DEHF) en agua potable y superficial**

Asimismo, la figura 4.13 muestran los límites establecidos por la Danish Environmental Protection Agency (DEPA) para nonilfenoles (1000 ng/L) y butilbencilftalato (9000 ng/L) en agua superficial. En ninguna de las presas monitoreadas se rebasan éstos límites.



**Figura 4.13 Límites establecidos para nonilfenoles y butilbencilftalato en agua superficial**



### 4.1.3 Ubicación de las fuentes con mayor incidencia de contaminantes emergentes

Una vez identificados los contaminantes emergentes seleccionados en las diferentes fuentes de abastecimiento, así como la tendencia que éstos siguen respecto de su presencia y concentración, el siguiente paso consiste en señalar cuáles son las zonas donde se encontraron las fuentes de abastecimiento con mayor incidencia de contaminantes emergentes.

#### 4.1.3.1 Pozos

En la figura 4.14 se muestran los municipios del Estado de México donde se localizan los pozos en estudio. Aquí se señala como en los pozos de la zona norte se detectó la mayor concentración tanto de fármacos como de disruptores endocrinos, en especial en el pozo Coyotepec y pozo Geo, con la presencia de tres compuestos en cada uno.

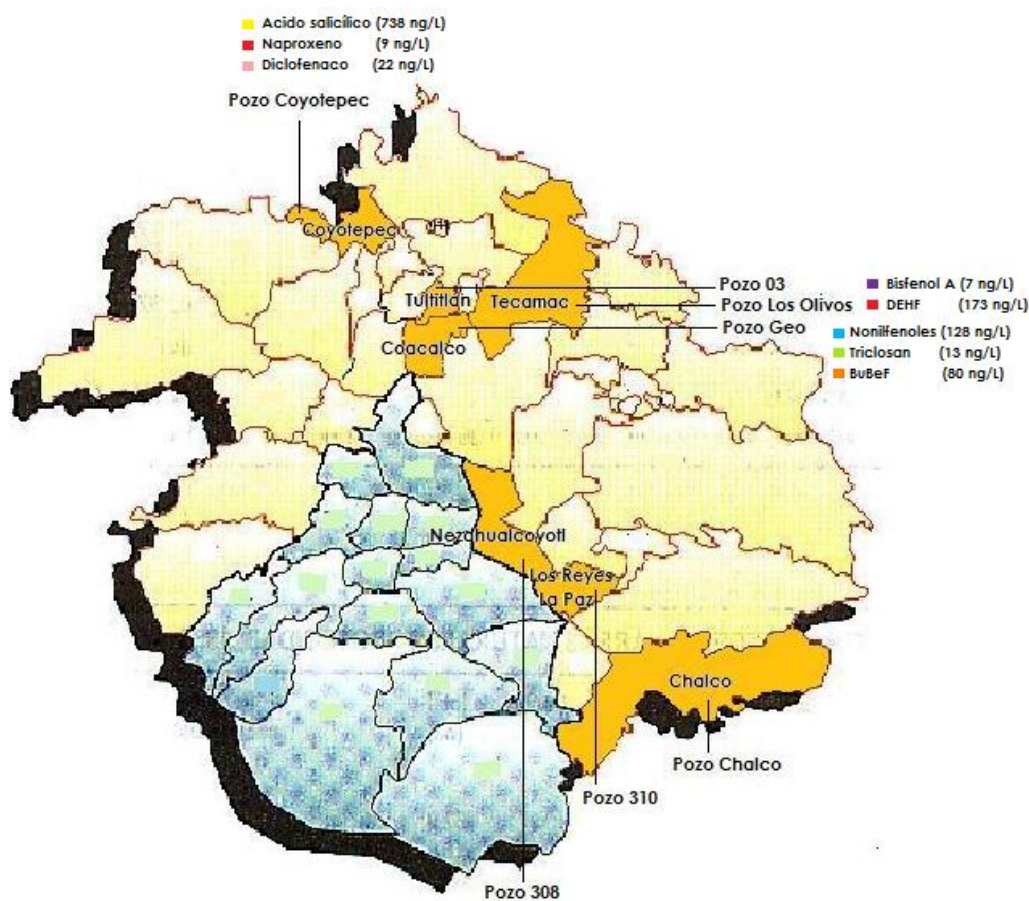


Figura 4.14 Ubicación de los pozos con mayor concentración de contaminantes emergentes



### 4.1.3.2 Tanques

En la figura 4.15 se muestran los tanques seleccionados para muestreo ubicados en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. En ésta, se posicionan las mayores concentraciones de contaminantes emergentes encontradas en los tanques. Así pues, se observa que los tanques localizados en la zona este presentaron el mayor número de compuestos, en especial el rebombero Quetzalcóatl y la Batería Santa Catarina Mixquic. Por otra parte, cabe resaltar las altas concentraciones (4690 ng/L) de dietilhexilftalato (DEHF) que se detectaron en los tanques Dolores y Caída del Borracho, cuyos tanques regulan los caudales extraídos del Sistema Lerma.

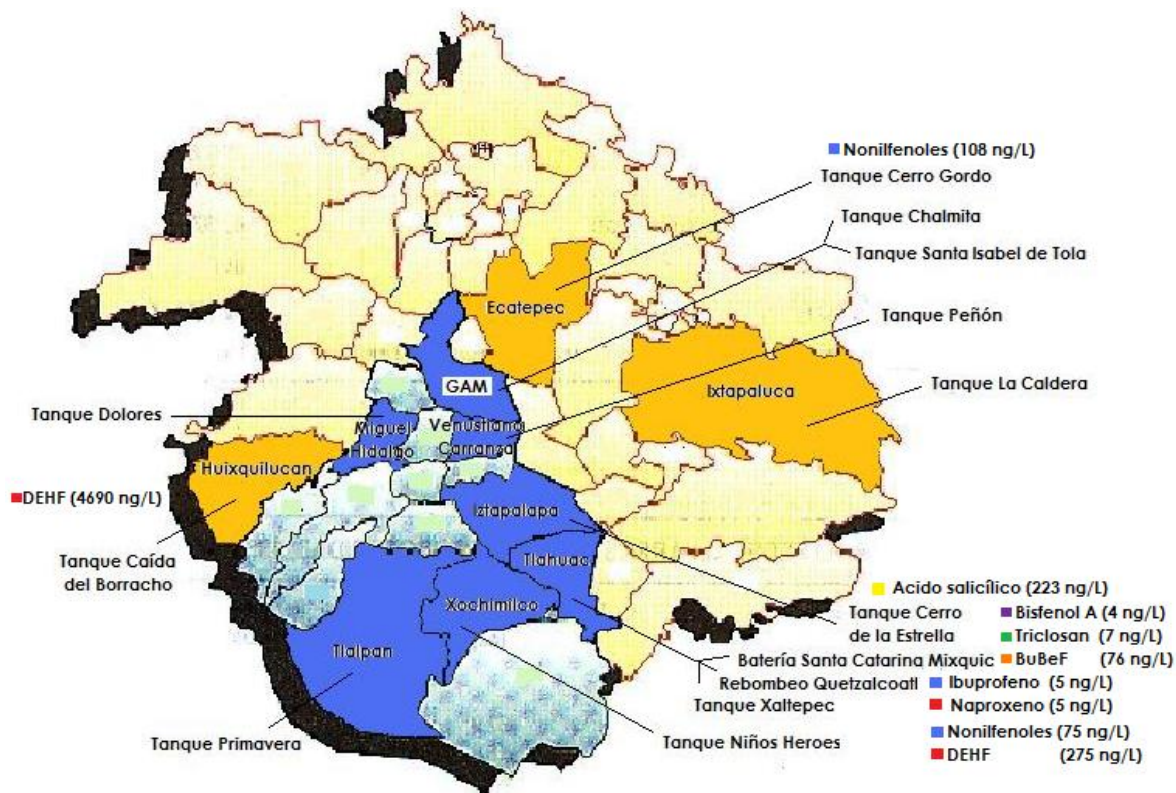


Figura 4.15 Ubicación de los tanques con mayor concentración de contaminantes emergentes

## **4.2 Comparación de las concentraciones de contaminantes emergentes encontradas en las fuentes de suministro y las reportadas en agua residual**

Con el objeto de tener una idea aproximada de la cantidad de emergentes que se transportan desde la fuente principal de agua residual, hasta lo que puede llegar a las fuentes de agua, se comparó la concentración encontrada de cada contaminante en pozos y presas con lo reportado en agua residual. Los datos de agua residual presentados, fueron tomados de estudios previos realizados dentro del grupo de trabajo en el Instituto de Ingeniería (Chávez *et al.*, 2008), que consistió en el muestreo de agua residual del Emisor Central, tomando éste último como un sitio representativo al acarrear toda el agua residual generada en la ZMVM. Así, planteando el peor de los escenarios, se consideran los datos para periodo de estiaje donde los contaminantes están más concentrados, y se seleccionaron las mayores concentraciones encontrados de cada contaminante emergente en las fuentes.

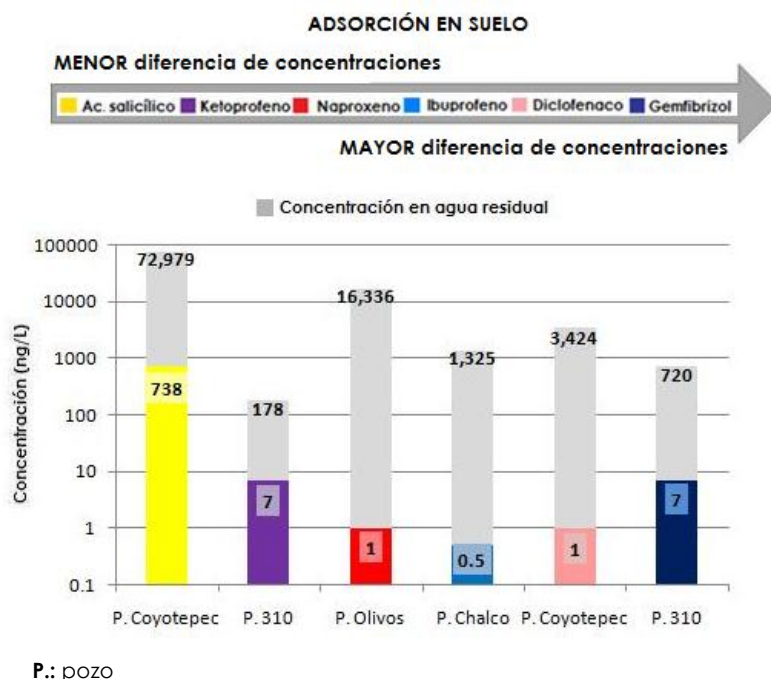
### **4.2.1 Fármacos**

#### **4.2.1.1 Pozos**

La presencia de contaminantes emergentes en el agua de los pozos se atribuye a la posible infiltración de agua residual a través del suelo, donde se esperaría que los fármacos fuesen retenidos hasta un valor límite a partir del cual por las condiciones (concentración, velocidad de infiltración, agotamiento de la capacidad de adsorción por el suelo, etc.) se transfieran por tanto al agua.

En la figura 4.16, se presentan las concentraciones de fármacos tanto en agua residual como en agua de pozos. En el lado izquierdo se presentan el ácido salicílico y el ketoprofeno, que al encontrarse en concentraciones mayores (respecto del resto de los fármacos) en el agua de los pozos, su concentración está mas próxima de la reportada en agua residual. Del lado derecho del gráfico,

se encuentran naproxeno, ibuprofeno, diclofenaco y gemfibrozil, con concentraciones muy por debajo de las encontradas en el agua residual. Por lo que en la tabla 4.1, se presentan los porcentajes de eliminación de los fármacos, y los de su permanencia en los pozos monitoreados. En ésta, se observa que los porcentajes de las concentraciones que llegan al agua de los pozos, son bajos al ser menores al 4%.



**Figura 4.16 Comparación de la concentración de fármacos en agua residual con agua de pozos que abastecen al norte y este de la ZMCM en periodo de estiaje**

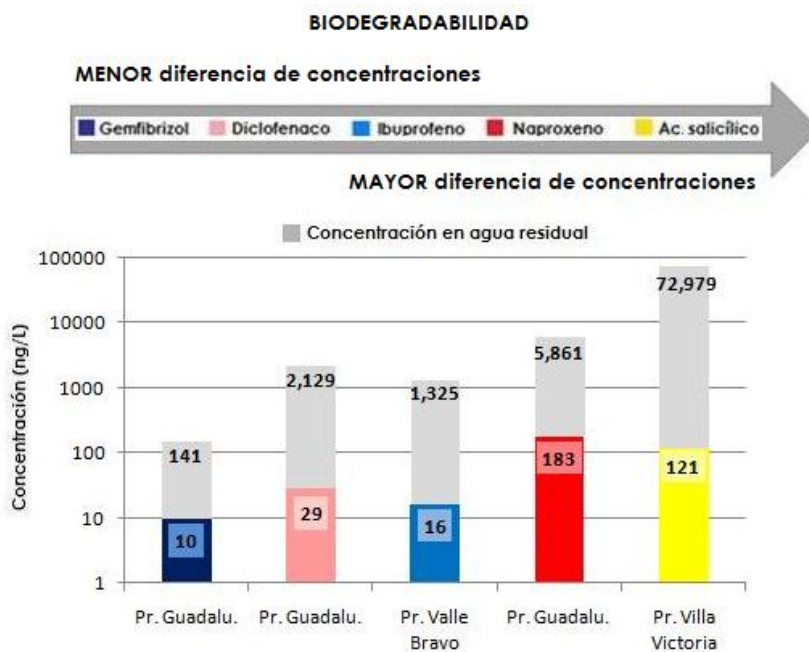
**Tabla 4.1 Porcentajes de eliminación y permanencia, de fármacos en pozos**

FÁRMACO	AGUA RESIDUAL* Conc. inicial (ng/L)	AGUA EN POZOS Conc. final (ng/L)	% ELIMINACIÓN	%PERMANENCIA EN POZOS
Ac. salicílico	72,979	738	98	<2
Ketoprofeno	178	7	96	<4
Naproxeno	16,336	1	99	<1
Ibuprofeno	1,325	0.5	99	<1
Diclofenaco	3,424	1	99	<1
Gemfibrozil	720	7	99	<1

\*Chávez et al., 2008

### 4.2.1.2 Presas

Las presas al ser cuerpos de agua superficial, son mas vulnerables de recibir contaminación por medio la escorrentía que puede provenir de los poblados aldeanos y de las zonas agrícolas regadas con agua residual. Por lo anterior, la figura 4.17 muestra las concentraciones de los fármacos en agua residual y en el agua de las presas que abastecen al Sistema Cutzamala.



Pr.: presa

**Figura 4.17 Comparación de la concentración de fármacos en agua residual con agua de presas que abastecen al sistema Cutzamala**

En las presas se detectan concentraciones menos alejadas de lo reportado en agua residual, es decir que tal como se observa en la tabla 4.2, se determinan mayores porcentajes de permanencia de fármacos que en el caso de los pozos (tabla 4.1), donde en presas se determina hasta 7% de la concentración de los fármacos en agua residual.

**Tabla 4.2 Porcentajes de eliminación y permanencia de fármacos en presas**

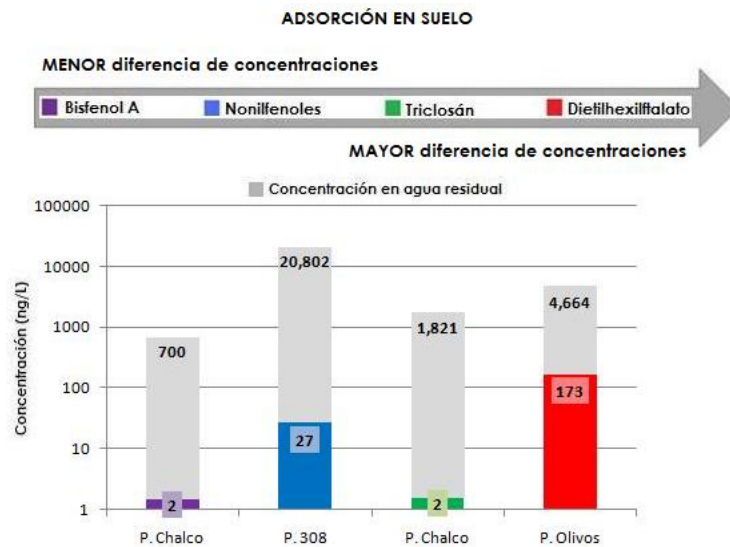
FÁRMACO	AGUA RESIDUAL* Conc. inicial (ng/L)	AGUA EN POZOS Conc. final (ng/L)	% ELIMINACIÓN	%PERMANENCIA
Gemfibrozil	141	10	93	<7
Diclofenaco	2,129	29	98	<2
Ibuprofeno	1,325	16	98	<2
Naproxeno	5,861	183	96	<4
Ac. salicílico	72,979	121	99	<1

\*Chávez et al., 2008

## 4.2.2 Disruptores endocrinos

### 4.2.2.1 Pozos

En la figura 4.18 (en un ejercicio similar con los fármacos en la sección 4.2.1.1) se muestran las concentraciones de los disruptores endocrinos tanto en agua residual como en el agua de los pozos. En este caso se observa un comportamiento menos característico, sin embargo los disruptores endocrinos presentan porcentajes bajos de permanencia en pozos, siendo para la mayoría menor al 1% (tabla 4.3).



**Figura 4.18 Comparación de la concentración de disruptores endocrinos en agua residual con agua de pozos que abastecen al norte y este de la ZMCM en periodo de estiaje**

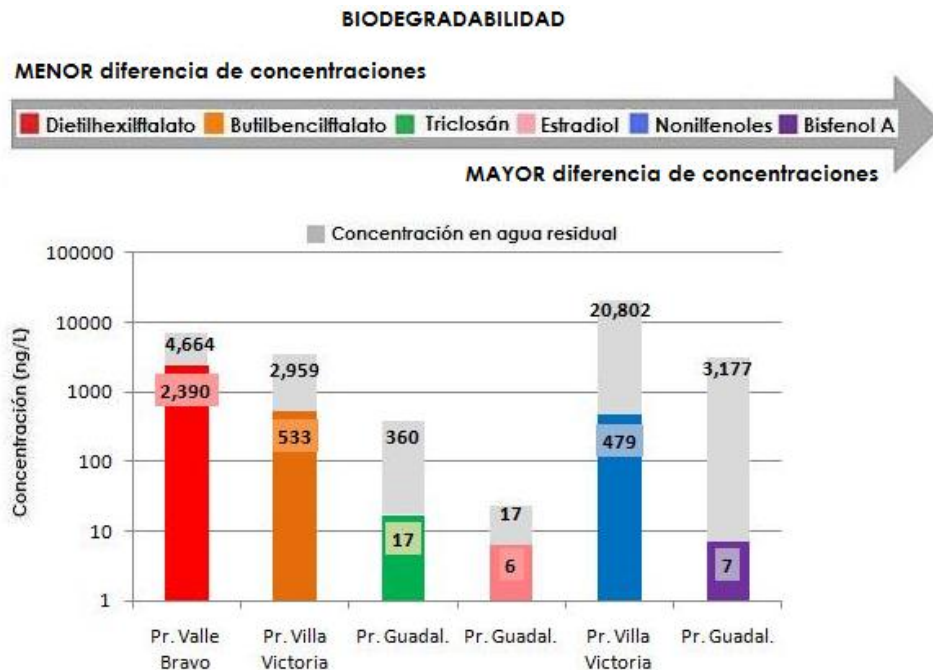
**Tabla 4.3 Porcentajes de eliminación y permanencia de disruptores endocrinos en pozos**

DISRUPTOR ENDOCRINO	AGUA RESIDUAL* Conc. inicial (ng/L)	AGUA EN POZOS Conc. final (ng/L)	% ELIMINACIÓN	%PERMANENCIA
Bisfenol A	700	2	99	<1
Nonilfenoles	20,802	27	99	<1
Triclosan	1,821	2	99	<1
DEHF	4,664	173	96	<4

\*Chávez et al., 2008

#### 4.2.2.2 Presas

La figura 4.19 presenta las concentraciones de disruptores endocrinos en agua residual, y en agua de presas que abastecen al sistema Cutzamala.



Pr.: presa

**Figura 4.19 Comparación de la concentración de disruptores endocrinos en agua residual con agua de presas que abastecen al sistema Cutzamala**

Las concentraciones de los disruptores endocrinos en las presas, muestran concentraciones más cercanas a lo reportado en agua residual que los pozos (figura 4.18); en especial dietilhexilftalato y butilbencilftalato. La tabla 4.4 presenta mayor variabilidad de los porcentajes de permanencia de los compuestos en las presas, obteniéndose hasta un 52% de la concentración presente en agua residual para dietilhexilftalato.

**Tabla 4.4 Porcentajes de eliminación y permanencia de disruptores endocrinos en presas**

<b>DISRUPTOR ENDOCRINO</b>	<b>AGUA RESIDUAL Conc. inicial (ng/L)</b>	<b>AGUA EN POZOS Conc. final (ng/L)</b>	<b>%ELIMINACIÓN</b>	<b>%PERMANENCIA</b>
DEHF	4,664	2,390	<b>48</b>	<b>&lt;52</b>
BuBeF	2,959	533	<b>81</b>	<b>&lt;19</b>
Triclosan	360	17	<b>95</b>	<b>&lt;5</b>
Estradiol	17	6	<b>64</b>	<b>&lt;36</b>
Nonilfenoles	20,802	479	<b>97</b>	<b>&lt;3</b>
Bisfenol A	3,177	7	<b>99</b>	<b>&lt;1</b>

\*Chávez *et al.*, 2008

### **4.3 Eficiencia de remoción de contaminantes emergentes en los sistemas de potabilización**

La determinación de la eficiencia de remoción de los contaminantes emergentes, se llevó a cabo en dos tipos de sistemas de potabilización: convencional y avanzado. Se analizó la concentración en el influente y efluente de las plantas potabilizadoras, para evaluar de forma integral su sistema de tratamiento en la remoción de dichos contaminantes.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos en las plantas potabilizadoras, se vieron ampliamente afectados por las condiciones en que se encontraron operando dichas plantas. Por un lado, los sistemas avanzados monitoreados pese a contar con trenes de tratamiento bien equipados, la mayoría de sus procesos se encontraron en precarias condiciones y fuera de operación. Aunado a esto, el agua que alimenta estas plantas presentó una deplorable calidad con color amarillento y olor desagradable, lo que pudo afectar en el estudio; prueba de ello fue la imposibilidad de detectar ninguno de los fármacos seleccionados. Por otro lado, en un escenario contrastante, las plantas convencionales estaban funcionando en eficientes condiciones, y con la totalidad de los procesos que componen su tren de tratamiento.

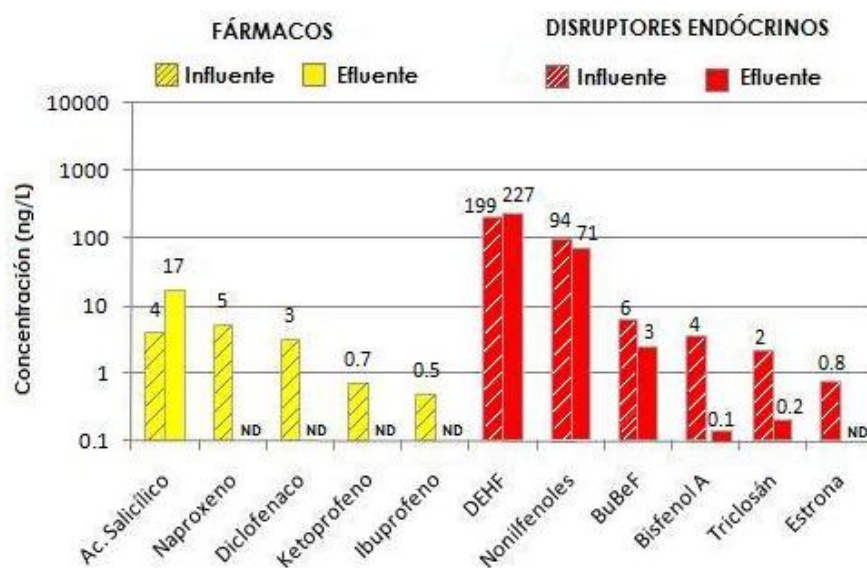
#### **4.3.1 Sistema de potabilización convencional**

Los sistemas convencionales que se presentan a continuación, tratan agua superficial proveniente de presas. La planta Los Berros recibe en el influente la mezcla del agua de siete presas. Por el contrario, la planta Madín trata el agua proveniente solo de una presa con el mismo nombre.



### 4.3.1.1 Planta potabilizadora Los Berros

El sistema de tratamiento de la planta Los Berros fue previamente descrito en la sección 1.1.3.1. En la figura 4.20 se presentan las concentraciones de los fármacos y disruptores endocrinos tanto en el influente como en el efluente de la planta, en periodo de lluvia.



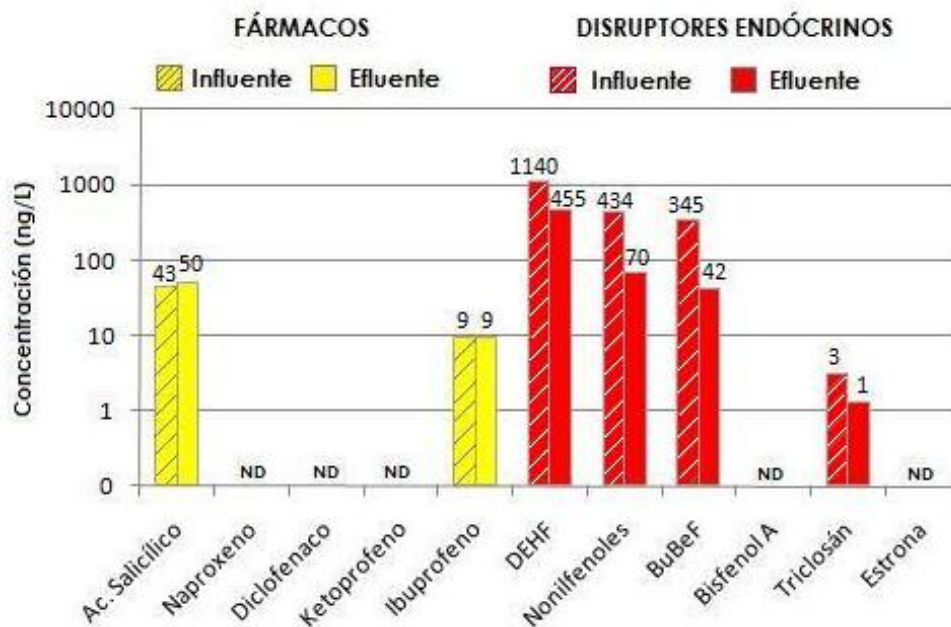
INF: influente; EFL: efluente; ND: no detectado

**Figura 4.20 Concentraciones de contaminantes emergentes en el influente y efluente de la planta potabilizadora Los Berros, en periodo de lluvia**

En la planta Los Berros en periodo de lluvia, para la mayoría de los contaminantes emergentes se obtienen menores concentraciones en el efluente que el influente. En el caso de los fármacos naproxeno, diclofenaco, ketoprofeno e ibuprofeno ya no se detectaron en el efluente. Éstos, son los compuestos más hidrofílicos encontrados en las fuentes de agua (Stackelberg et al., 2007), por lo que pueden reaccionar con el cloro libre que persiste a través de los procesos por la pre-cloración aplicada en la planta Los Berros, y no ser detectados con la técnica analítica empleada. Respecto de los disruptores endocrinos, los nonilfenoles, butilbencilftalato (BuBeF), bisfenol A y triclosan se detectan en menor concentración en el efluente que el influente de la planta, a diferencia de estrona que ya no se detecta. Con un comportamiento distinto a los compuestos

anteriores, el fármaco ácido salicílico y el disruptor endocrino dietilhexilftalato (DEHF), se presentan en concentraciones ligeramente mayores en el efluente que el influente de la planta, posiblemente debido a la ubicuidad de estos compuestos en el ambiente acuático. En los sistemas de potabilización convencional, la coagulación química es uno de los procesos más comúnmente utilizados, debido a su eficiente remoción de materia orgánica de alto peso molecular en el agua (Vieno et al., 2006). Sin embargo, la literatura señala que la presencia de matrices orgánicas especialmente las fracciones de bajo peso molecular, en este caso moléculas pequeñas como el ácido salicílico, inhiben el proceso de la coagulación para su remoción (Semmens and Ayers, 1985).

En la figura 4.21 se presentan las concentraciones de los fármacos y disruptores endocrinos en el influente y el efluente de la planta potabilizadora Los Berros, para periodo de estiaje.



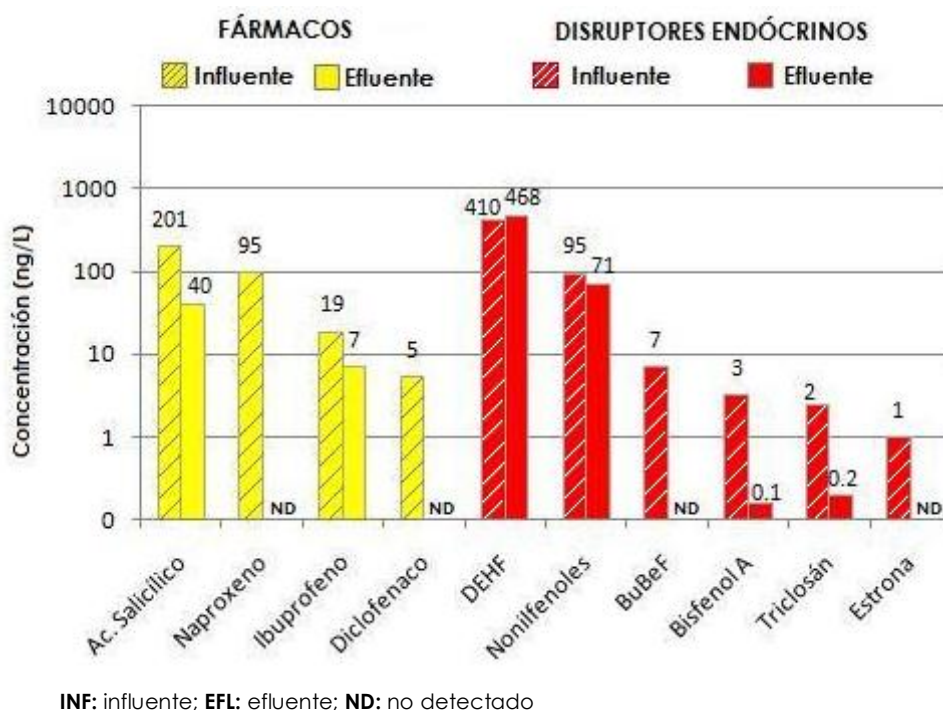
INF: influente; EFL: efluente; ND: no detectado

**Figura 4.21 Concentraciones de contaminantes emergentes en el influente y efluente de la planta potabilizadora Los Berros, en periodo de estiaje**

La presencia de contaminantes emergentes es menor en periodo de estiaje que de lluvia (figura 4.20). En la figura 4.21 los fármacos ácido salicílico e ibuprofeno, se detectan en concentraciones similares en el influente y efluente de la planta. Los disruptores endocrinos DEHF, nonilfenoles, BuBeF y triclosán se detectan en concentraciones menores en el efluente que en el influente de la misma. Por otro lado, bisfenol A y estrona no son detectados ni en el influente ni el efluente de la planta.

#### 4.3.1.2 Planta potabilizadora Madín

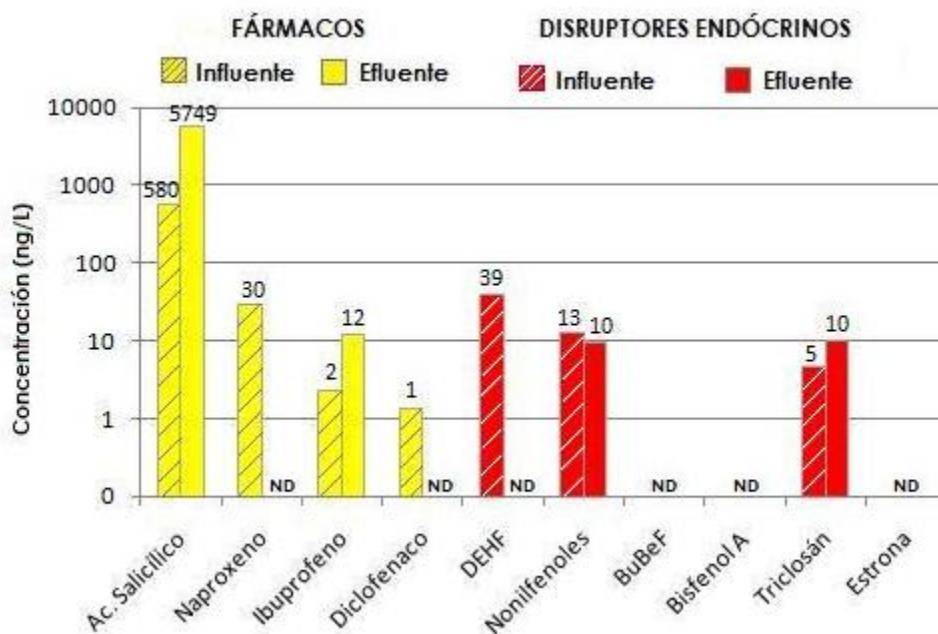
El sistema de tratamiento de la planta Madín fue previamente descrito en la sección 1.1.3.1. En la figura 4.22 se presentan las concentraciones de fármacos y disruptores endocrinos en el influente y efluente de la planta potabilizadora Madín, en periodo de lluvia.



**Figura 4.22 Concentraciones de contaminantes emergentes en el influente y efluente de la planta potabilizadora Madín, en periodo de lluvia**

En la figura 4.22 se observa que con excepción del disruptor endocrino dietilhexilftalato (DEHF), el resto de los contaminantes emergentes encontrados en la planta Madín, se presentan en menor concentración en el efluente que el influente, e incluso algunos ya no son detectados en el efluente. Las concentraciones de los contaminantes en la planta Madín son mayores a las presentes en la planta Los Berros en periodo de lluvias (figura 4.20). Esto se debe a que en la planta Los Berros, el influente recibe la mezcla del agua de las siete presas que lo abastece, compensando las concentraciones de los contaminantes presentes para obtener una calidad de agua con mayor facilidad de tratamiento. A diferencia de la planta Madín, donde el influente solamente recibe agua de una presa (presa Madín), la cual cuenta con una menor calidad de agua que hace más complicado su tratamiento.

En la figura 4.23 se presentan las concentraciones de fármacos y disruptores endocrinos en el influente y efluente de la planta Madín, en periodo de estiaje.



**Figura 4.23 Concentraciones de contaminantes emergentes en el influente y efluente de la planta potabilizadora Madín, en periodo de estiaje**

El ácido salicílico presenta concentraciones superiores al resto de los contaminantes, mostrando una concentración mayor en el efluente que en el influente de la planta. A excepción del fármaco anterior, en términos generales el resto de los pocos contaminantes encontrados se detectaron con concentraciones menores en periodo de estiaje que de lluvia (figura 4.22); e incluso los disruptores endocrinos BuBeF, bisfenol A y estrona ya no son detectados.

#### 4.3.1.3 Análisis de los porcentajes de remoción determinados por compuesto

##### Fármacos

En la tabla 4.5 se presentan los porcentajes de remoción determinados para los fármacos encontrados en los sistemas de potabilización.

**Tabla 4.5 Eficiencia de remoción (%) de fármacos en los sistemas de potabilización convencionales**

COMPUESTO	PLANTAS	PROCESOS	LLUVIA			ESTIAJE		
			INFL (ng/L)	EFL (ng/L)	%R	INFL (ng/L)	EFL (ng/L)	%R
<b>Ac. Salicílico</b>	Berros	Cl - Co - Flo - S - F	4	7	NEG	43	50	NEG
	Madín	Cl - Co - Flo - S - F - Cl	201	40	<b>80</b>	580	5749	NEG
<b>Ibuprofeno</b>	Berros	Cl - Co - Flo - S - F	0.5	<LD	<b>100</b>	9	9	<b>0</b>
	Madín	Cl - Co - Flo - S - F - Cl	19	7	<b>63</b>	2	12	NEG
<b>Naproxeno</b>	Berros	Cl - Co - Flo - S - F	5	<LD	<b>100</b>	<LD	<LD	ND
	Madín	Cl - Co - Flo - S - F - Cl	95	<LD	<b>100</b>	30	<LD	<b>100</b>
<b>Diclofenaco</b>	Berros	Cl - Co - Flo - S - F	3	<LD	<b>100</b>	<LD	<LD	ND
	Madín	Cl - Co - Flo - S - F - Cl	5	<LD	<b>100</b>	1	<LD	<b>100</b>
<b>Ketoprofeno</b>	Berros	Cl - Co - Flo - S - F	0.7	<LD	<b>100</b>	<LD	<LD	ND

INFL: influente; EFL: efluente; %R: porcentaje de remoción; Cl: cloración; Co: coagulación; Flo: floculación; S: sedimentación; F: filtración; ND: no determinado; <LD: debajo del límite de detección; NEG: valor negativo

La presencia de fármacos en ambas plantas es mayor en periodo de lluvia que de estiaje. Para este último periodo (estiaje) se presentan dos escenarios distintos: por un lado ácido salicílico e ibuprofeno (que se detectaron en mayor concentración que lluvia), no mostraron porcentajes de remoción al encontrarse con mayor concentración en el efluente que el influente de las plantas. Por otro lado, naproxeno y diclofenaco (presentes con menor concentración que en lluvia) mostraron remociones de 100% solo en la planta Madín, debido a las bajas concentraciones en que se encontraron.

Ahora bien, de los fármacos detectados en las plantas potabilizadoras, el ácido salicílico fue el que presentó menor eficiencia de remoción en los sistemas convencionales, mostrando un 80% de remoción sólo en la planta Madín para periodo de lluvia. En Los Berros el porcentaje de remoción fue negativo al detectar una mayor concentración del fármaco en el efluente de la planta. El ácido salicílico tiene una alta polaridad que lo incorpora fácilmente en el ambiente acuático, convirtiéndolo posiblemente en un compuesto difícil de remover por un sistema convencional.

Ibuprofeno fue removido sólo en temporada de lluvias en ambas plantas. La remoción en Madín fue menor (63%) que en Los Berros (100%). Esto en parte debido a la detección de una mayor concentración en Madín, cuya planta es abastecida solo por una presa con agua de menor calidad, a comparación de Los Berros que es abastecida por siete presas que mezclan sus caudales reduciendo la concentración de contaminantes. Lo anterior indica que ibuprofeno puede llegar a ser eficientemente removido con un sistema convencional en caso de tratar agua superficial que no presente elevada contaminación; si lo contrario fuera el caso, para lograr obtener buenas remociones sería necesario un sistema de potabilización conformado por procesos más complejos.

Naproxeno y diclofenaco, son los fármacos mejor removidos en los sistemas convencionales, al mostrar porcentajes de 100% en ambas plantas. Nuevamente, en el influente de la planta Madín se detectó mayor concentración que en Los Berros, en este caso de naproxeno. Por último, ketoprofeno se detecta con la menor concentración solo en Los Berros en periodo de lluvia, y se removió en un 100%.

### Disruptores endocrinos

La tabla 4.6 presenta los porcentajes de remoción de disruptores endocrinos determinados en los sistemas de potabilización convencional. Al igual que para los fármacos, se detectó mayor número de compuestos en lluvia que en estiaje. Sin embargo cabe resaltar, que los disruptores endocrinos que se detectaron en estiaje (dietilhexilftalato, nonilfenoles, BuBeF y triclosan), presentaron concentraciones mayores que en lluvia en especial en la planta Los Berros.

**Tabla 4.6 Eficiencia de remoción (%) de disruptores endocrinos en los sistemas de potabilización convencionales**

COMPUESTO	PLANTAS	PROCESOS	LLUVIA			ESTIAJE		
			INFL (ng/L)	EFL (ng/L)	%R	INFL (ng/L)	EFL (ng/L)	%R
<b>Dietilhexilftalato</b>	Berros	Cl - Co - Flo - S - F	199	227	NEG	1140	455	<b>60</b>
	Madín	Cl - Co - Flo - S - F - Cl	410	468	NEG	39	<LD	<b>100</b>
<b>Nonilfenoles</b>	Berros	Cl - Co - Flo - S - F	94	71	<b>24</b>	434	70	<b>83</b>
	Madín	Cl - Co - Flo - S - F - Cl	95	71	<b>26</b>	13	10	<b>23</b>
<b>BuBeF</b>	Berros	Cl - Co - Flo - S - F	6	3	<b>50</b>	345	42	<b>87</b>
	Madín	Cl - Co - Flo - S - F - Cl	7	<LD	<b>100</b>	<LD	<LD	ND
<b>Triclosan</b>	Berros	Cl - Co - Flo - S - F	2	0.2	<b>90</b>	3	1	<b>66</b>
	Madín	Cl - Co - Flo - S - F - Cl	2	0.2	<b>90</b>	5	10	NEG
<b>Bisfenol A</b>	Berros	Cl - Co - Flo - S - F	4	0.1	<b>97</b>	<LD	<LD	ND
	Madín	Cl - Co - Flo - S - F - Cl	3	0.1	<b>96</b>	<LD	<LD	ND
<b>Estrona</b>	Berros	Cl - Co - Flo - S - F	0.8	<LD	<b>100</b>	<LD	<LD	ND
	Madín	Cl - Co - Flo - S - F - Cl	1	<LD	<b>100</b>	<LD	<LD	ND

El disruptor endocrino dietilhexilftalato fue el que presentó menor remoción en los sistemas convencionales. En periodo de lluvia, los porcentajes de remoción mostraron valores negativos en ambas plantas, ya que la concentración en el efluente fue mayor que el influente. En periodo de estiaje, en la planta Los Berros se determinó un menor porcentaje (60%) que en Madín (100%); sin embargo, habría que señalar que en Los Berros se detectó una mayor concentración del compuesto, lo que reduce la eficiencia de la planta para removerlo.

Los nonilfenoles en términos generales fueron removidos en ambas plantas alrededor de un 20%. La excepción es en periodo de estiaje en la planta Los Berros, donde se remueven hasta un 83% del compuesto; sin embargo, la concentración que se detecta en el influente es mayor que en lluvia.

El compuesto BuBeF en periodo de lluvia, presentó mejores porcentajes de remoción en la planta Madín (100%) que en Los Berros (50%). Para analizar lo anterior, es necesario mencionar que la toma de muestra en el efluente de la planta Madín, se realizó después de la desinfección final con cloro, caso contrario en la planta Los Berros, donde la toma de muestra se hizo antes de dicha cloración. El cloro es un fuerte oxidante que reacciona y transforma los compuestos orgánicos en moléculas más sencillas de remover. En periodo de estiaje, aunque la concentración detectada de BuBeF fue mayor que en lluvia, en la planta Los Berros se obtuvieron considerables remociones de 87%.

Por último, los disruptores endocrinos triclosan, bisfenol A y estrona que fueron encontrados en bajas concentraciones (entre 0.1 ng/L y 4 ng/L) en lluvia, presentaron considerables porcentajes de remoción similares en ambas plantas, resultando de 90%, 97% y 100%, respectivamente.

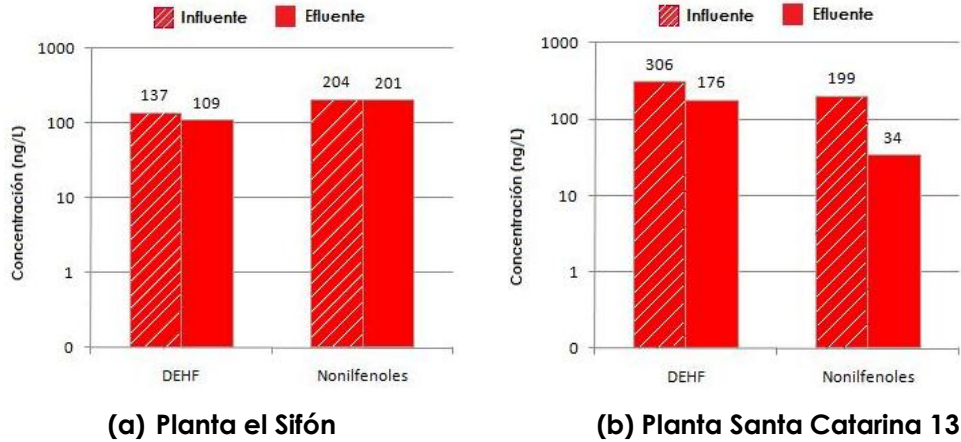


### **4.3.2 Sistema de potabilización avanzado**

Las plantas potabilizadoras avanzadas seleccionadas para el análisis en esta sección, son plantas a pie de pozo ubicadas en la zona este de la Ciudad de México. En esta zona, existe el precedente de la elevada contaminación que persiste en el acuífero de la región a causa de su sobre explotación, presentando elevadas concentraciones de hierro y manganeso, entre otros. En ninguna de estas plantas fue posible detectar ninguno de los fármacos seleccionados, posiblemente debido a la reacción que tuvieron con los contaminantes presentes en ésta agua subterránea. Por lo anterior, la evaluación de los sistemas avanzadas se hizo sólo en función de la remoción de los disruptores endocrinos detectados. Aunado a esto, el estado de operación de algunas de las plantas seleccionadas, presentó deficiencias con respecto de su tren de tratamiento y del mantenimiento de los equipos, muchos de los cuales estaban fuera de operación. Las condiciones en que se encontraron las plantas al momento de la toma de muestra, se describe en el Anexo C.

#### **4.3.2.1 Planta potabilizadora El Sifón y Santa Catarina 13**

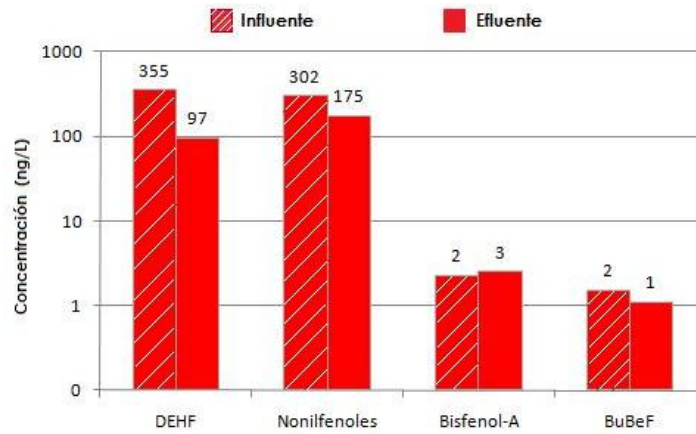
Las dos plantas que se estudiaron en esta sección (El Sifón y Santa Catarina 13 (SC13)), tenían en operación todos los procesos (biofiltración, filtración a presión (sólo en SC13), adsorción, ósmosis inversa y desinfección) con los que está conformado su sistema de tratamiento avanzado (previamente descrito en la sección 1.1.3.2). En la figura 4.24, se muestran las concentraciones de los disruptores endocrinos detectados, donde las concentraciones de dietilhexilftalato (DEHF) y nonilfenoles fueron similares en el influente y efluente de dichas plantas.



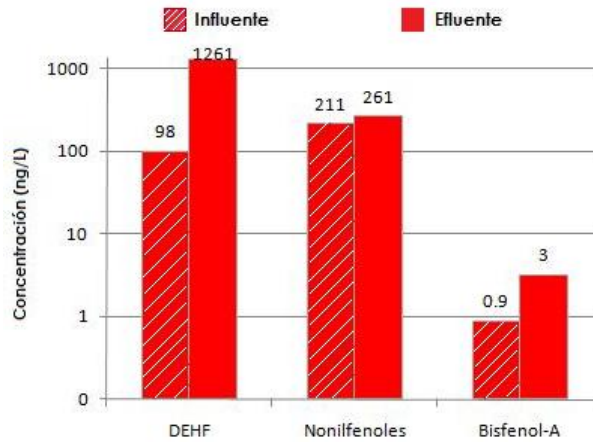
**Figura 4.24 Concentraciones de contaminantes emergentes en el influente y efluente de las plantas potabilizadoras: (a) el Sifón y (b) Santa Catarina 13**

#### **4.3.2.2 Planta potabilizadora Agrícola Oriental y Santa María Aztahuacán**

En esta sección, las dos plantas en estudio tuvieron en operación sólo tres procesos (filtración, adsorción y desinfección) de todo su sistema de tratamiento (descrito en la sección 1.1.3.2). En la figura 4.25, se muestran las concentraciones de los disruptores endocrinos detectados en el influente y efluente de las plantas.



(a) Agrícola Oriental



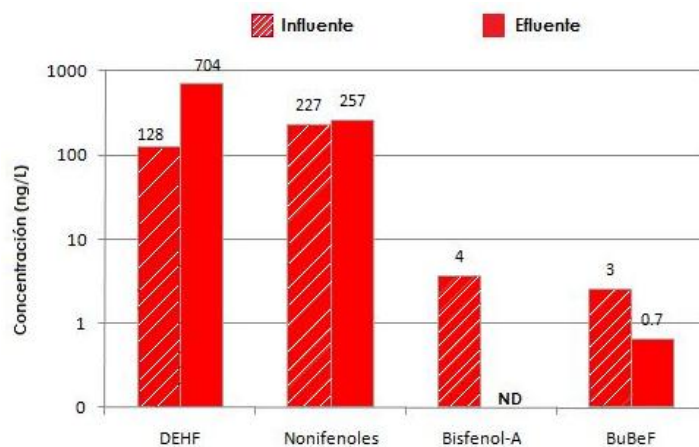
(b) Santa María Aztahuacán

**Figura 4.25 Concentraciones de contaminantes emergentes en el influente y efluente de las plantas potabilizadoras: (a) Agrícola Oriental y (b) Santa María Aztahuacán**

Los disruptores endocrinos detectados en ambas plantas fueron DEHF, nonilfenoles y bisfenol A; además de éstos, en la planta Agrícola Oriental también se detectó butilbencilftalato (BuBeF). En la figura 4.25 (a) se observa que en la planta Agrícola Oriental DEHF, nonilfenoles y BuBeF presentan una menor concentración en el efluente que en el influente, y la excepción es bisfenol A con una mayor concentración en el efluente. En la figura 4.25(b), se muestra que en la planta Santa María Aztahuacán la concentración de los tres disruptores endocrinos detectados (DEHF, nonilfenoles y bisfenol A) fue mayor en el efluente que el influente de la planta.

### 4.3.2.3 Planta potabilizadora Santa Cruz Meyehualco

En esta planta ninguno de los procesos que conforma su sistema de tratamiento estaba en operación (sección 1.1.3.2). Así, el agua por tratar solamente es recirculada a través de los procesos y al final recibe desinfección con la aplicación de hipoclorito de sodio. La figura 4.26 muestra las concentraciones de los disruptores endocrinos encontrados.



**Figura 4.26 Concentraciones de disruptores endocrinos en el influente y efluente de la planta potabilizadora Santa Cruz Meyehualco**

En la figura 4.26, se observa que para dietilhexilftalato (DEHF) y nonilfenoles las concentraciones en el efluente son mayores que en el influente. Por el contrario, BuBeF presenta menor concentración en el efluente de la planta, y bisfenol A ya no es detectado en el efluente de la misma.

#### 4.3.2.4 Análisis de los porcentajes de remoción determinados por compuesto

##### Disruptores endocrinos

La tabla 4.7 presenta los porcentajes de remoción de los disruptores endocrinos encontrados en los sistemas de potabilización avanzados.

**Tabla 4.7 Eficiencia de remoción (%) de disruptores endocrinos en los sistemas avanzados**

COMPUESTO	PLANTAS	PROCESOS	INFL (ng/L)	EFL (ng/L)	%R	OBSERVACIONES
<b>Bisfenol A</b>	SCM	D	4	<LD	<b>100</b>	En SCM la infraestructura del lugar así como las condiciones de los equipos, tenían mejor estado que en AO y SMA. La remoción del compuesto podría atribuirse a la recirculación del agua a través de los procesos.
	AO	FG – Ad - D	2	3	NEG	
	SMA	FP – Ad - D	0.9	3	NEG	
<b>BuBeF</b>	SCM	D	3	0.7	<b>76</b>	En la planta SCM solo se aplica desinfección como tratamiento del agua, por lo que la remoción del compuesto se adjudica a su oxidación con cloro.
	AO	FG – Ad - D	2	1	<b>50</b>	
<b>DEHF</b>	AO	FG – Ad - D	355	97	<b>73</b>	Los mejores porcentajes obtenidos en AO y SC13, posiblemente se deban a que la filtración previa a la adsorción, ayuda a retener la materia orgánica que pudiera competir con los contaminantes orgánicos por los sitios de adsorción.
	SC13	BF – FP – Ad – OI - D	306	176	<b>42</b>	
	El Sifón	BF – Ad - OI - D	137	109	<b>20</b>	
	SMA	FP – Ad - D	98	1261	NEG	
	SCM	D	128	704	NEG	
<b>Nonilfenoles</b>	SC13	BF – FP – Ad – OI - D	199	34	<b>83</b>	Al igual que con el DEHF, nuevamente se atribuye una mejor eficiencia en las plantas SC13 y AO, a la presencia de filtración en su tren de tratamiento. Por otro lado, el bajo porcentaje en el Sifón podría deberse a las condiciones en que se realizó la toma de muestra (Anexo B).
	AO	FG – Ad - D	302	175	<b>42</b>	
	El Sifón	BF – Ad - OI - D	204	201	<b>1</b>	
	SMA	FP – Ad - D	211	261	NEG	
	SCM	D	227	257	NEG	

**INFL:** influente; **EFL:** efluente; **%R:** porcentaje de remoción; **SC13:** Santa Catarina 13; **AO:** Agrícola Oriental; **SMA:** Santa María Aztahuacán; **SCM:** Santa Cruz Meyehualco; **BF:** biofiltración; **FP:** filtración a presión; **FG:** filtración a gravedad; **Ad:** adsorción; **OI:** ósmosis inversa; **D:** desinfección; **ND:** no determinado; **<LD:** debajo del límite de detección; **NEG:** valor negativo

Los dos primeros disruptores endocrinos bisfenol A y BuBeF, presentaron bajas concentraciones (de 0.7 ng/L a 4 ng/L) en el influente y efluente de los sistemas avanzados, mostrando intervalos de concentración reducidos que complicaron la evaluación de su remoción en las plantas. Además, estos mismos compuestos que indican una mayor remoción (100% y 76%, respectivamente) en la planta Santa Cruz Meyehualco (SCM), ciertamente presentan valores de los cuáles no se puede realizar el análisis integral del sistema de tratamiento, debido a que en dicha planta el agua solamente recibe desinfección con hipoclorito de sodio. Así, la remoción de bisfenol A y BuBeF en la planta SCM, se adjudica a su oxidación con cloro.

La remoción de DEHF fue mayor en las plantas Agrícola Oriental (AO) (73%) y Santa Catarina 13 (SC13) (42%), que en el Sifón (20%). Lo anterior puede atribuirse a que el sistema de tratamiento de AO y SC13, incluye previo a la adsorción (Ad) la operación de filtración que ayuda a retener la materia orgánica que pudiera competir con los contaminantes orgánicos por los sitios de adsorción.

El comportamiento de los nonilfenoles en los sistemas avanzados es similar que para DEHF. Nuevamente las mejores remociones se obtienen en las plantas SC13 (83%) y AO (42%), muy posiblemente por la presencia de la filtración en su tren de tratamiento. También habría que mencionar que en El Sifón, al momento de hacer la toma de muestra la planta tenía aproximadamente 3 horas de haberse puesto en marcha por cuestiones de mantenimiento, lo que probablemente pudo afectar en los resultados obtenidos al no tener una estabilización total en el funcionamiento de los equipos.

### **4.3.3 Propuesta teórica de un tren de tratamiento para remover los contaminantes emergentes**

Una vez analizados los sistemas convencionales y avanzados respecto de su eficiencia de remoción de contaminantes emergentes, se atribuye la eliminación de los compuestos a los procesos de coagulación/floculación y cloración en las plantas convencionales, y en las avanzadas a la adsorción en carbón activado. Para esto, en la tabla 4.8 se hace una comparación de los porcentajes de remoción obtenidos en el presente trabajo, con diferentes estudios reportados para los procesos propuestos.

Los fármacos que sólo fueron detectados en los sistemas convencionales, en su mayoría presentaron remociones del 100%. Para estos sistemas, la bibliografía señala que el proceso fisicoquímico de coagulación-floculación remueve bajos porcentajes de fármacos (alrededor de un 20%), sin embargo la cloración es en términos generales la responsable de la remoción casi total de los fármacos, al presentar valores de hasta 95% de su eliminación. Aunado a esto, se podría asegurar la remoción completa de los compuestos incluyendo el proceso de adsorción en carbón activado, que según la bibliografía remueve hasta en un 90%.

**Tabla 4.8 Remoción (%) de contaminantes emergentes mediante los procesos propuestos**

COMPUESTO PROCESO	Co/Flo	Ad	Cl	Convencional* Co/Flo - Cl	Avanzado* F - Ad
<b>FÁRMACOS</b>					
Antibióticos <sup>2</sup>		>90	90		
MCRX <sup>3</sup>	15	50			
Ac. Salicílico				80	
Ibuprofeno	<20 <sup>1</sup> 50 <sup>4</sup>	16 <sup>1</sup>	75 <sup>1</sup>	63 - 100	
Naproxeno	<20 <sup>1</sup>	52 <sup>1</sup>	95 <sup>1</sup>	100	
Diclofenaco	<20 <sup>1</sup> 77 <sup>4</sup>	39 <sup>1</sup>	95 <sup>1</sup>	100	
Ketoprofeno				100	
<b>DISRUPTORES ENDOCRINOS</b>					
Bisfenol A	0 <sup>5</sup>	75 <sup>5</sup>	58 <sup>5</sup>	97	100 (Cl)
BuBeF				50 - 100	50 76 (Cl)
DEHF				60 - 100	20 (Ad) 40 - 70
Nonilfenoles	0 <sup>5</sup>	0 <sup>5</sup>	70 <sup>5</sup>	25 - 80	40 - 80
Estrona	5 <sup>1</sup>	76 <sup>1</sup>	95 <sup>1</sup>	100	
Triclosán	<20 <sup>1</sup>	89 <sup>1</sup>		66 - 90	
<b>COMPUESTOS ORGÁNICOS EN GENERAL<sup>5</sup></b>					
Fármacos Detergentes Retardantes de flama Plastificantes Pesticidas	15	53	32		

**Co/Flo:** coagulación/floculación; **F:** filtración; **Ad:** adsorción en carbón activado; **Cl:** cloración; **MCRX:** medios de contraste para rayos X; **DEHF:** dietilhexilftalato; **[1]** Westerhoff et al., 2005; **[2]** Adams et al., 2002; **[3]** Seitz et al., 2006; **[4]** Vieno et al., 2006; **[5]** Stackelberg et al., 2007; \* Presente trabajo

Los disruptores endocrinos siguen el mismo patrón de remoción de los fármacos, la menor remoción la realiza el proceso de coagulación-floculación (<20%), y enseguida la adsorción en carbón activado y la cloración se encargan de remover el remanente de su concentración con valores de hasta 89% y 95%, respectivamente. El estudio realizado por Stackelberg et al., (2007) acerca de la



remoción de distintos compuestos orgánicos, indica que la remoción de éstos se distribuye entre los procesos propuestos de la siguiente forma: coagulación-floculación (15%), cloración (32%) y adsorción (53%), de esta forma logrando una remoción total de los compuestos. Por lo anterior, el tren de tratamiento que se propone para la remoción de los contaminantes emergentes seleccionados (considerando la fuente de agua) es el siguiente:

Pre-cloración – coagulación – floculación – sedimentación - filtración – adsorción - Desinfección

## **5. CONCLUSIONES**

Definitivamente, existe la presencia de contaminantes emergentes en las fuentes de suministro de la ZMCM. Esto no es de extrañar, ya que las fuentes subterráneas y superficiales han sido contaminadas con el agua residual que se fuga del sistema de drenaje o se usa para riego. Sin embargo, la concentración de contaminantes emergentes que llegan al usuario final es atenuada, en primer lugar, por la infiltración del agua a través del suelo y en segundo, por los sistemas de potabilización. No obstante, estos sistemas solo remueven de manera parcial a estos contaminantes, debido a su funcionamiento inadecuado, especialmente de los sistemas avanzados. Una mayor eficiencia puede ser alcanzada si se emplean de manera apropiada los sistemas de tratamiento avanzados con que ya se cuenta.

### **5.1 Presencia de contaminantes emergentes en las fuentes de abastecimiento**

En las fuentes de abastecimiento monitoreadas, las presas presentaron el menor número de contaminantes emergentes y la mayor concentración de los mismos. En contraste, los tanques contaron con el mayor número de compuestos, pero en menor concentración, posiblemente por el efecto de mezclado.

En los tanques, la presencia de contaminantes emergentes fue mayor en periodo de lluvia que de estiaje, lo cual puede deberse a un mayor arrastre de compuestos durante las precipitaciones.

En los pozos, la presencia de los disruptores endocrinos fue mayor en el periodo de lluvia que de estiaje, esto puede deberse a que durante las precipitaciones la escorrentía transporta a los compuestos hacia zonas con altas tasas de infiltración. En contraste, los fármacos tuvieron una menor presencia en periodo de lluvia, misma que se explica por la alta polaridad de éstos, que los hace más solubles, propiciando su dilución.

Los pozos más contaminados fueron encontrados en la zona norte de la ZMCM, en tanto que los tanques con mayor afectación se ubicaron en la zona oriente.

## **5.2 Comparación de las concentraciones de contaminantes emergentes encontradas en las fuentes de suministro y las reportadas en agua residual**

La concentración de contaminantes emergentes encontrada en los pozos corresponde al 1% de aquella reportada en agua residual. En las presas, esta diferencia es más cerrada, ya que las concentraciones determinadas en el agua superficial llegan a ser hasta un 52% de las correspondientes al agua residual.

## **5.3 Eficiencia de remoción de contaminantes emergentes en los sistemas de potabilización**

Las remociones de contaminantes emergentes determinadas en los sistemas avanzados de potabilización (40% y 80% únicamente para dos disruptores endocrinos) fueron menores a las encontradas en los sistemas convencionales (100% para fármacos y entre 25% y 95% para los disruptores endocrinos).

## **5.4 Propuesta teórica de un tren de tratamiento para remover contaminantes emergentes**

A partir de los datos obtenidos y de acuerdo a la literatura, los procesos que son capaces de remover contaminantes emergentes a nivel de trazas son coagulación-floculación y cloración en los sistemas convencionales analizados y filtración-adsorción en los sistemas avanzados. Por esto, de manera general -y de acuerdo al agua que se quiera tratar- el tren de tratamiento que se propone para la remoción de contaminantes emergentes es el siguiente:

Pre-cloración – coagulación – floculación – sedimentación - filtración – adsorción – Desinfección

## RECOMENDACIONES

Con el fin de tener un panorama claro de la presencia de contaminantes emergentes en las fuentes de abastecimiento y poder respaldar los resultados obtenidos, es necesario hacer un monitoreo continuo de dichos compuestos en los diferentes sitios que abastecen de agua potable.

Por otra parte, se deben evaluar los riesgos a la salud que trae consigo la exposición prolongada a dosis subterapéuticas de fármacos. De este modo, al confirmar su presencia y efectos potenciales, formen parte de los parámetros que deben ser regulados en las fuentes de agua por las instituciones pertinentes.

Resultaría conveniente llevar a cabo un estudio para conocer la remoción de los contaminantes emergentes en cada proceso que conforman los trenes de tratamiento avanzado. Ello cuando estos se encuentren funcionando bajo las mínimas condiciones de eficiencia.

En lo que respecta a la propuesta de tratamiento en este trabajo, puede resultar interesante llevar a cabo pruebas bajo condiciones controladas de laboratorio de los procesos de coagulación-floculación (con su respectivas etapas de sedimentación y filtración), adsorción y cloración, para establecer los parámetros óptimos en la remoción de contaminantes emergentes.

Por otro lado, es de suma importancia la capacitación del personal encargado de los sistemas de potabilización, desde la enseñanza de su buen funcionamiento hasta su habilitación para obtener resultados más óptimos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agenson, K., Oh, J. y Urase, T (2003), **Retention of a wide variety of organic pollutants by different nanofiltration/reverse osmosis membranes: controlling parameters of process**, *Journal of Membrane Science* **225**, 91-103
- Ahel, M., Schaffner, C. y Giger, W. (1996), **Behaviour of alkylphenol polyethoxylate surfactants in the aquatic environment-III. Occurrence and elimination of their persistent metabolites during infiltration of river water to groundwater** *Water Research* **30(1)**, 37-46
- Ahrer, W., Scherwenk, E. y Buchberger, W. (2001), **Determination of drug residues in water by the combination of liquid chromatography or capillary electrophoresis with electrospray mass spectrometry** *Journal of Chromatography A* **910**, 69-78
- Avdeef, A., Box, K. J., Comer, J. E. A., Hibbert, C. and Tam, K.Y., (1998), **Determination of liposomal membrane-water partitioning coefficients of ionizable drugs**, *Pharmaceutical Res.* **15(2)**, 209-215.
- Barceló, D., Chiron, S., Fernandez Alba, A., Valverde, A., Alpendurada, M.F. (1996). **Monitoring pesticides and metabolites in surface water and groundwater in Spain.** *ACS Symp. Ser.* **630**, 237 - 253.
- Barceló, D. (2003). **Emerging pollutants in water analysis.** *Trends in Analytical Chemistry* **22(10)**.
- Barceló, D. (2008). **Fate and Toxicity of Emerging Pollutants, Their Metabolites and Transformation Products in the Aquatic Environment.** *Trends in Analytical Chemistry* **27(11)**, 991-1007.

- Birkett, J.W. y Lester J.N. (2003). **Endocrine Disrupters in Wastewaters and Sludge Treatment Processes**. Editorial Lewis Publishers (IWA Publishing).
- Bolz, U., Hagenmaier, H. y Körner, W. (2001). **Phenolic xenoestrogens in surface water, sediments, and sewage sludge from Baden-Württemberg, south-west Germany** *Environmental Pollution* **115**, 291-301.
- Boyd, G., Reemtsma H., Grimm, D. y Mitra, S. (2003). **Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in surface and treated waters of Louisiana, USA and Ontario, Canada**. *The Science of the Total Environment* **311**, 135 – 149.
- Campbell, C.G., Borglin, S.E., Green, G.B., Grayson, A., Wozni, E., Stringfellow, W.T., (2006). **Biologically directed environmental monitoring, fate, and transport of estrogenic endocrine disrupting compounds in water: A review**. *Chemosphere*, **65**, 1265-1280.
- Carballa, M., Omil, F., Lema, J., Llompart, M., García-Jares, C., Rodríguez, I., Gómez, M., Ternes, T. (2004). **Behavior of pharmaceuticals, cosmetics and hormones in a sewage treatment plant**. *Water Research* **3**, 2918-2926
- Carballa, M., Fink, G., Omil, F., Lema, J.M. y Ternes, T. (2008). **Determination of the solid-water distribution coefficient ( $K_d$ ) for pharmaceuticals, estrogens and musk fragrances in digested sludge**. *Water Research* **42**, 287 - 295.
- Cargouët, M., Perdiz, D., Mouatassim-Souali, A., Tamisier-Karolak, S. y Levi, Y. (2004). **Assessment of river contamination by estrogenic compounds in Paris area (France)**. *Science of the Total Environment* **324**, 55 - 56.
- Castelan, E. (2002). **Water Management in the Mexico City Metropolitan Area: The Hard Way to Learn**. *Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua*, México.

Chavez, A., Genthe, B., Jeffrey, P., Jiménez, B., Le Corre, K., Gibson, R., Steyn, M., Tredoux, G. (2008). **RECLAIM WATER**. Contract-No. 018309, A Specific Targeted Research Project under the Thematic Priority 'Global Change and Ecosystems' Work Package 4 Technical water reclamation and aquifer recharge case studies The Tula Valley, Mexico Milestone M 4.3TTC. *proyecto 7314*, pp 6-20. 10 November 2008.

Cheng, C., Liu, L. y Ding, W. (2006). **Occurrence and seasonal variation of alkylphenols in marine organisms from the coast of Taiwan** *Chemosphere* **65**, 2152-2159.

Cherry, J. (1984). **Groundwater contamination**. En **Short Course in Environmental Geochemistry**; Ed. Fleet, M.E.; Mineralogical Association of Canada, Londres, Inglaterra; *Handbook Vol. 10*, 269-306.

Cirja, M., Ivashechkin, P., Schäffe, A., Philippe y Corvini, P. (2007) **Factors affecting the removal of organic micopollutants from wastewater in conventional treatment plantas (CTP) and membrane bioreactors (MBR)**. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology* **10.1007/s11157-007-9121-8**.

Cleuvers, M. (2003). **Aquatic ecotoxicity of pharmaceuticals including the assessment of combination effects**. *Toxicology Letters* **142**, 185-194.

CONAGUA (2005). Síntesis de las Estadísticas del Agua en México, Comisión Nacional del Agua – México.

Dagnat Cendrine, Teil Marie-Jeanne, Chevreuil Marc y Blanchard Martine (2009). **Phthalate removal throughout wastewater treatment plant Case study of Marne Aval station (France)**. *Science of The Total Environment*, **407**, 1235 - 1244.

- Daughton, C. and Ternes, T. (1999). **Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Environment: Agents of Subtle Change?**. *Environmental Health Perspectives*, **107**(6), 907-938.
- Daughton, C. (2004). **Non-regulated water contaminants: emerging research**. *Environmental Impact Assessment Review* **24**, 711-732.
- Dodd, M., Buffle, M., von Gunten, U. (2006). **Oxidation of Antibacterial molecules by aqueous ozone: moiety-specific reaction kinetics and application to ozone-based wastewater treatment**. *Environ. Sci. Technol.* **40**(6), 1969-1977.
- Doll, T. E. y Frimmel, F. H. (2003). **Fate of pharmaceuticals, photodegradation by simulated solar UV-light**. *Chemosphere* **52**, 1757-1769.
- Dorabawila, N. y Gupta, G. (2005). **Endocrine disrupter – estradiol – in Chesapeake Bay tributaries**. *Journal of Hazardous Materials* **A120**, 67-71.
- Drewes, J.E., Heberer, T., y Reddersen, K. (2002). **Fate of pharmaceuticals during indirect potable reuse**. *Wat. Sci. Technol.* **46**, 73 - 80.
- Dubus, I.G., Barriuso, E. y Calvet, R. (2001). **Sorption of weak organic acids in soils: clofencet, 2,4-D and salicylic acid**. *Chemosphere* **45**, 767-774.
- Ellington, J. J. y Floyd, T. L. (1996) **Octanol/Water Partition Coefficients for Eight Phthalate Esters** United States National Exposure Environmental Protection Research Laboratory Agency Athens, GA 30605-2700 Research and Development EPA/600/S-96/006
- EPA (Environmental Protection Agency) (2001). **Removal of endocrine Disruptor Chemicals Using Drinking Water Treatment Processes**. Office of Research and Development. Washington, DC 20460. EPA/625/R-00/015. March 2001.



EPA (Environmental Protection Agency) (2003). Region/ORD Workshop on Emerging Pollutants. August 11-14.

Ezcurra, E., Cotler-Ávalos, M., Mazari-Hiriart, M. y de Anda, J. (2006). **Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala**. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. pp. 4 - 5.

Farré, M., Ferrer, I., Ginebreda, A., Figueras, M., Olivella, L., Vilanova, M. y Barceló, D. (2001). **Determination of drugs in surface water and wastewater samples by liquid chromatography-mass spectrometry: methods and preliminary results including toxicity studies with *Vibrio fischeri*** *Journal of Chromatography A* **938**, 187-197.

Farré, M., Pérez, S., Kantiani, L., Barceló, D. (2008). **Fate and Toxicity of Emerging Pollutants, Their Metabolites and Transformation Products in The Aquatic Environment**. *Trends in Analytical Chemistry* **27**(11), 991-1007.

Fenjin J., Yiwan, M I. Lihuian, W. Shutao, (2005) **Trophodynamic Behavior of 4-Nonylphenol and Nonylphenol Polyethoxylate in a Marine Aquatic Food Web from Bohai Bay, North China: Comparison to DDTs**, *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 4801-4807

Fent, G., W.J. Hein, M.J. Moendel, R. Kubiak, (2003) **Fate of 14C-bisphenol A in soils**, *Chemosphere* **51**, 735-746.

Gibson R., Becerril-Bravo E., Silva-Castro V. and Jiménez-Cisneros B. (2007). **Determination of Acidic Pharmaceuticals and Potential Endocrine Disrupting Compounds in Wastewaters and Spring Waters by Selective Elution and Determination by Gas Chromatography – Mass Spectrometry**, *Journal of Chromatography A*. **1169**, 31 – 39.

- González, S., Petrovic, M., Barceló, D. (2007). **Removal of a Broad Range of Surfactants from Municipal Wastewater comparison between Membrane Bioreactor and Conventional Activated Sludge Treatment.** *Chemosphere* **67**, 335-343.
- Hans – Rudolf Buser, Thomas Poiger y Markus D. Muller (1998a) **Occurrence and Fate of the Pharmaceutical Drug Diclofenac in Surface Waters: Rapid Photodegradation in a Lake,** *Environ. Sci. Technol.*, **32 (22)**, 3449 - 3456.
- Hans – Rudolf Buser y Markus D. Muller (1998b) **Occurrence of the Pharmaceutical Drug Clofibric Acid and the Herbicide Mecoprop in Various Swiss Lakes and in the North Sea,** *Environ. Sci. Technol.*, **32**, 188 - 192.
- Hassan H. B., Miha' Ly Kata, Istva'N Eros y Zolta' N Aigner, (2004) **Preparation and Investigation of Inclusion Complexes Containing Gemfibrozil and DIMEB,** *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, **50**: 219–225.
- Heberer, T., Schmidt-Baumler, K., Stan, H.J. (1998) **Occurrence and distribution of organic contaminants in the aquatic system in Berlin. Part 1: Drug residues and other polar contaminants in Berlin surface and groundwater.** *Acta Hydrochem. Hydrobiol.* **26**, 272-278.
- Heisterkamp, I., Gandrass, J. y Ruck, W. (2004), **Bioassay-directed chemical analysis utilizing LC-MS: a tool for identifying estrogenic compounds in water samples?** *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **378 (3)**, 709-715.
- Henschel, K.-P., Wenzel, A., Diedrich, M. y Fliedner, A. (1997), **Environmental hazard assessment of Pharmaceuticals,** *Regulatory Toxicology and Pharmacology* **25**, 220–225.

- Huang, P., Tien, C., Sun, Y., Hsieh, C. y Lee, C. (2008), **Occurrence of phthalates in sediment and biota: Relationship to aquatic factors and the biota-sediment accumulation factor**, *Chemosphere* **73**, 539 - 544.
- Huber, M., Gobel, A., Joss, A., Hermann, N., Loffler, D., McArdell, S., Ried, A., Siegrist, H., Ternes, A., von Gunten, U. (2005). **Oxidation of pharmaceuticals during ozonation of municipal wastewater effluents: a pilot study**. *Environ. Sci. Technol.* **39**(11), 4290-4299.
- INEGI (2005), Censo Nacional de Población 2005, Instituto Nacional de Geografía e Informática, México <http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.aspx>
- Institute for Health and Consumer Protection (2003), **European Chemicals Bureau, 4,4'-ISOPROPYLIDENEDIPHENOL (BISPHENOL-A) EINECS**, No: 201-245-8 Summary Risk Assessment Report, I-21020 Ispra (VA) Italy
- Jiménez C. B., Cruickshank C., Chávez A., Palma A., Pérez R. y Jiménez R. (1999). **Estudio de la factibilidad del empleo del agua del acuífero del Valle del Mezquital para suministro del Valle de México**. Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 8384 elaborado para la Comisión Nacional del Agua. Diciembre de 1998, 1500 p.p.
- Jiménez C.B.E., Marín L., Morán d., (2005). **El agua en México vista desde la Academia**, Ed. Academia Mexicana de Ciencias, ISBN: 968-7428-22-8. Impreso en México. 411 p.
- Jiménez C. B.E., Becerril-Bravo E., Chávez A., Gibson R., Maya C., Quezada L. (2008). **Análisis de la calidad del agua de las fuentes actuales de suministro y revisión de los procedimientos de potabilización**, UNAM. Proyecto 6348, elaborado para la Comisión Nacional del Agua. 74 p.p.

- Jurgens, M.D., Holthaus, K.I., Johnson, A.C., Smith, J.L., Hetheridge, M. y Williams, R.J. (2002). **The potential for estradiol and ethinylestradiol degradation in English rivers.** *Environ. Toxicol. Chem.* **21**, 480 - 488.
- Joss, A., Zabczynski, S., Göbel, A., Hoffman, B., Löffler, D., McArdell, C., Ternes, T., Thomsen, A. y Siegrist, H. (2002). **Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment: Proposing a classification scheme** *Water Research* **40**, 1686-1696.
- Kim, J., Park P., Lee, C., Kwon, H., Lee, S. (2008a). **A novel hybrid System for the Removal of endocrine Disrupting Chemicals: Nanofiltration and Homogeneous Catalytic Oxidation.** *Journal of Membrane Science* **312**, 66-75.
- Kim, J., Park, P., Lee, C. y Kwon, H., (2008b) **Surface modification of nanofiltration membranes to improve the removal of organic micro-pollutants (EDCs and PhACs) in drinking water treatment: Graft polymerization and cross-linking followed by functional group substitution.** *Journal of Membrane Science* **321**, 190-198.
- Kim, S., Cho, J., Kim, I., Vanderford, B., Snyder, S. (2007). **Ocurrence and Removal of Pharmceuticals and Endocrine disruptors in South Korean surface, drinking, and waste waters.** *Water Research* **41**, 1013-1021.
- Kolpin, D., Furlong, E., Meyer, M., Thurman, E., Zaugg, S., Barber, L. y Buxton, H. (2002). **Pharmaceuticals, Hormones, and Other Organic Wastewater Contaminants in U.S. Streams, 1999-2000: A National Reconnaissance.** *Environ. Sci. Technol.* **36**, 1202-1211.
- Kuch, H., y Ballschmiter, K. (2001). **Determination of Endocrine-Disrupting Phenolic Compounds and Estrogens in Surface and Drinking Water by HRGC-(NCI)-MS in the Picogram per Liter Range.** *Environ. Sci. Technol.* **35**, 3201-3206.

- Kuster, M., López, M., Hernando, M., Petrovic, M., Martín, J. y Barceló, D. (2008). **Analysis and occurrence of pharmaceuticals, estrogens, progestogens and polar pesticides in sewage treatment plant effluents, river water and drinking water in the Llobregat river basin (Barcelona, Spain)** *Journal of Hydrology* **358**, 112-113.
- Kümmerer K. (ed). (2004). **Pharmaceuticals in the Environment. Source, Fate, Effects and Risks**. 2a edición. Editorial Springer.
- K.M. Lai, K.L. Johnson, M.D. Scrimshaw, J.N. Lester, (2000) **Binding of water-borne steroid estrogens to solid phases in river and estuaries systems**, *Environ. Sci. Technol.* **34**, 3490– 3494.
- Lee, J., Lee B., Ra J., Cho J., Kim I., Chang N., Kim H., Kim S., (2008). **Comparison of the Removal Efficiency of Endocrine Disrupting Compounds in pilot scale Sewage Treatment Processes**. *Chemosphere* **71**, 1582-1592.
- Li, L., Zhu, W., Zhang, P., Zhang, Q., y Zhang, Z. (2006) **AC/O<sub>3</sub>-BAC process for removing refractory and hazardous pollutants in raw water**. *Journal of Hazardous Materials* **B135**, 129-133.
- Llorca-Pórcel Julio, Martínez-Parreño Marta, Martínez-Soriano Esther y Valor Ignacio (2009) **Analysis of chlorophenols, bisphenol-A, 4-tert-octylphenol and 4-nonylphenols in soil by means of ultrasonic solvent extraction and stir bar sorptive extraction with in situ derivatisation**. *Journal of ChromatographyA* **1216**, 5955 - 5961.
- Lorien J. Fono, Edward P. Kolodziej y David L. Sedlak (2006) **Attenuation of Wastewater-Derived Contaminants in an Effluent-Dominated River**. *Environ. Sci. Technol.* **40**, 7257 - 7262.

Machatha, S. G., Yalkowsky, S. H. (2005) **Comparison of the octanol/water partition coefficients calculated by ClogP®, ACDlogP and KowWin® to experimentally determined values**, *International Journal of Pharmaceutics* **294** 185–192.

Mersmann, P., Scheytt, T. y Heberer, T. (2003) **Column experiments on the transport behavior of pharmaceutically active compounds in the saturated zone**, *Acta Hydroch Hidrob* **30**, 275 - 284.

MITI 1992: **Biodegradation and bioaccumulation data of existing chemicals based on the CSCL Japan**. Japan Chemical Industry Ecology-Toxicology & Information Center.

Nakada, N., Shinohara, H., Murata, A., Kiri, K., Managaki, S., Sato, N., Takada, H. (2007). **Removal of selected pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and endocrine-disrupting chemicals (EDCs) during sand filtration and ozonation at a municipal sewage treatment plant**. *Water Research* **41**, 4373-4382.

Nasu, M., Goto, M., Kato, H., Oshima, Y. y Tanaka, H. (2001). **Study on endocrine disrupting chemicals in wastewater treatment plants**. *Water Science and Technology* **43(2)**, 101-108.

Naylor, CG., Mieure, JP., Adams, WJ., Weeks, JA., Castaldi, FG., Ogle, LD., Romano, RR (1992). *J Am Oil Chem Soc* **69**: 695.

Nicholls, P.H. y Evans, A.A. (1991). **Sorption of ionisable organic compounds by field soils. Part 1: Acids**. *Pestic. Sci.* **33**, 319 - 330.

Öllers, S., Singer, H., Fassler, P. y Müller, S. (2001). **Simultaneous quantification of neutral and acidic pharmaceuticals and pesticides at the low-ng/l lever in surface and waste water** *Journal of Chromatography A* **911**, 225-234.

Plan Maestro de Agua Potable del Distrito Federal 1997 – 2010, Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

Perló, M. y González, A. (2005) **¿Guerra por el agua en el Valle de México? Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México**, PUEC – UNAM y Fundación Friedrich Ebert, México (Segunda edición 2009).

Rittmann, B. y McCarty, P. (2001) **Environmental Biotechnology, Principles and Applications**; McGraw-Hill, Boston.

Ruetsch D. (2000) **DOC – removal in recharge water by Soil – Aquifer - Treatment**. *Groundwater Research*.

Sacher, F., Lange, F., Brauch, H. y Blankenhorn, I. (2001) **Pharmaceuticals in groundwaters Analytical methods and results of a monitoring program in Baden-Württemberg, Germany**. *Journal of Chromatography A* **938**, 199-210.

Schellenberg K., Leuenberger C. y Schwarzenbach R.P. (1984) **Sorption of phenols by natural and aquifer materials**. *Environ. Sci. Technol.* **18**, 652 - 657.

Scheytt, T., Mersmann, P., Lindstadt, R. y Heberer T. (2005) **Determination of sorption coefficients of pharmaceutically active substances carbamazepine, diclofenac, and ibuprofen, in sandy sediments**. *Chemosphere* **60**, 245 - 253.

- Schulman, L., Sargent, E., Naumann, B., Faria, E., Dolan, D. y Wargo, J. (2002) **A Human Health Risk Assessment of Pharmaceuticals in the Aquatic Environment.** *Human and Ecological Risk Assessment* **8(4)**, 657-680.
- Semmens, M.J. y Ayers, K. (1985). **Removal by coagulation of trace organics from Mississippi river water.** *J. AWWA* **77**, 79-84
- Shao, B., Hu, J., Min, Y., Wei, An. Y Tao, S. (2005) **Nonylphenol and Nonylphenol Ethoxylates in River Water, Drinking Water, and Fish Tissues in the Area of Chongqing, China** *Archives of Environmental Contamination & Toxicology* **48(4)**, 467-473.
- Silva-Castro, V., (2008). **Evaluación de contaminantes emergentes en fuentes de abastecimiento del Valle de Tula.** Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, UNAM. México.
- Singer, H., Muller, S., Tixier, C. y Pillonel, L. (2002). **Triclosan: Occurrence and Fate of a Widely Used Biocide in the Aquatic Environment: Field Measurements in Wastewater Treatment Plants, Surface Waters, and Lake Sediments.** *Environ. Sci. Technol.* **36**, 4998 - 5004.
- Snyder, S.A., Adham, S., Redding, A.M., Cannon, F.S., DeCarolis, J., Oppenheimer, J., Wert, E.C., Yoon, Y. (2007). **Role of Membranes and Activated Carbon in the Removal of Endocrine Disruptors and Pharmaceuticals.** *Desalination* **202**, 156 – 181.
- Stackelberg, P., Furlong, E., Meyer, M., Zaugg, S., Henderson, A. y Reissman, D., (2004). **Persistence of pharmaceutical compounds and other organic wastewater contaminants in a conventional drinking-water treatment plant.** *Science of the Total Environment* **329**, 99 – 113.



- Stackelberg, P., Gibs, J., Furlong, E., Meyer, M., Zaugg, S., y Lippincott, L. (2007). **Efficiency of conventional drinking-water-treatment processes in removal of pharmaceuticals and other organic compounds.** *Science of the Total Environment* **377**, 255 - 272
- Staples, C. A., Dorn, P. B., Klecka, G. M., O'Block, S. T., Branson, D. R. y Harris, L. R. (2000). **Bisphenol A concentrations in receiving waters near US manufacturing and processing facilities.** *Chemosphere* **40**, 521 - 525.
- Stumpf, M., Ternes, T., Wilken, R., Rodrigues, S. y Baumann, W. (1999). **Polar drug residues in sewage and natural waters in the state of Rio de Janeiro, Brazil.** *The Science of the Total Environment* **225**, 135-141
- Ternes, T. (1998). **Ocurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers.** *Waters Res.* **32**, 3245 – 3260.
- Tixier, C., Singer, H., Canonica, S. y Muller, S. (2002). **Phototransformation of Triclosan in Surface Waters: A Relevant Elimination Process for This Widely Used Biocide – Laboratory Studies, Field Measurements, and Modeling.** *Environ. Sci. Technol.* **36**, 3482 - 3489.
- Tixier, C., Heinz, P., Oellers, S. y Muller, S. (2003). **Occurrence and Fate of Carbamazepine, Clofibric Acid, Diclofenac, Ibuprofen, Ketoprofen, and Naproxen in Surface Waters.** *Environ. Sci. Technol.* **37(6)**, 1061-1068.
- Tsuda, T., Suga, K., Kaneda, E. y Ohsuga, M. (2002). **4-Nonylphenol, 4-Nonylphenol Mono- and Diethoxylates, and Other 4-Alkylphenols in Water and Shellfish from Rivers Flowing into Lake Biwa** *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology* **68(1)**, 126-131
- U.S. Department of Health and Human Services (DHHS) (1993). **Hazardous Substances Data Bank.** National Toxicology Information Program, National Library of Medicine, Bethesda, MD.

- Van der Meet, J. (2006) **Environmental pollution promotes selection of microbial degradation pathways.** *Front Ecol Environ* **4(1)**, 35-42
- Verliefde, A., Heijman, S., Cornelissen, E., Amy, G., Bruggen, B. y Dijk, J. (2007a) **Influence of electrostatic interactions on the rejection with NF and assessment of the removal efficiency during NF/GAC treatment of pharmaceutically active compounds in surface water.** *Water Research* **41**, 3227- 3240.
- Verliefde, A., Cornelissen, E., Amy, G., Bruggen, B. y Dijk, H. (2007b). **Priority organic micropollutants in water sources in Flanders and the Netherlands and assessment of removal possibilities with nanofiltration** *Environmental Pollution* **146**, 281-289
- Vieno, N., Tuhkander, T. y Kronberg, L. (2006). **Removal of pharmaceuticals in drinking water treatment: effect of the chemical coagulation.** *Environmental Technology* **27**, 183-192
- Von Gunten, U. (2003). **Ozonation of drinking water: part I. Oxidation kinetics and production formation.** *Water Res.* **37(7)**, 1433-1467.
- Wade, H.F., York, A.C., Morey, A.E., Padmore, J.M., Rudo, K.M. (1998). **The impact of pesticide use on groundwater in North Carolina.** *J. Environ. Qual.* **27**, 1018-1026.
- Westerhoff, P., Yoon, Y., Snyder, S. y Wert, E. (2005) **Fate of Endocrine-Disruptor, Pharmaceutical, and Personal Care Product chemicals during Simulated Drinking Water Treatment Processes.** *Environ. Sci. Technol.* **39**, 6649 - 6663.
- Wicks, C., Kelley, C. y Peterson, E. (2004) **Estrogen in a Karstic Aquifer** *Groundwater* **42(3)**, 384-389.

- Xia, K. y Jeong, C. Y. (2004) **Photodegradation of the endocrine-disrupting chemical 4-nonylphenol in biosolids applied to soil.** *Journal of environmental Quality* **33**, 1568-1574.
- Xiao, X., McCalley, D. y McEvoy, J. (2004) **Analysis of estrogens in river water and effluents using solid-phase extraction and gas chromatography-negative chemical ionization mass spectrometry of the pentafluorobenzoyl derivatives,** *Journal of Chromatography A* **923**(1-2), 195-204.
- X. Liu, H. Tanaka<sup>a</sup>, A. Yamauchi<sup>a</sup>, B. Testab, y H. Chumana (2004) **Lipophilicity Measurement by Reversed-Phase High-Performance Liquid Chromatography (RP-HPLC): A Comparison of Two Stationary Phases Based on Retention Mechanisms,** *Helv. Chim. Acta* Vol. **87**, pp 2866.
- Ying Guang-Guo, Rai S. Kookana y Peter Dillon (2003) **Sorption and degradation of selected five endocrine disrupting chemicals in aquifer material,** *Water Research* **37**, 3785 - 3791.
- Ying, G. (2006) **Lipophilicity Fate, behavior and effects of surfactants and their degradation products in the environment,** *Environment International* **32**, 417 - 431.
- Ying Guang-Guo, Yu Xiang-Yang y Kookana Rai S. (2007) **Biological degradation of triclocarban and triclosan in a soil under aerobic and anaerobic conditions and comparison with environmental fate modelling,** *Environment Pollution* **150**, 300 - 305.
- Yoon, Y., Westerhoff, P., Snyder, S., Wert, E. y Yoon, J. (2007) **Removal of endocrine disrupting compounds and pharmaceuticals by nanofiltration and ultrafiltration membranes,** *Desalination* **202**, 16-23.

Yuan, S. Y., Liu, C., Liao, C. S. y Chang, B. V. (2002) **Ocurrence and microbial degradation of phthalate esters in Taiwan river sediments**, *Chemosphere* **49**, 1295 - 1299.

Zeng, G.M., C. Zhang, G.H. Huang, J. Yu, Q. Wang, J.B. Li, B.D. Xi y H.L. Liu (2006) **Adsorption behavior of bisphenol A on sediments in Xiangjiang River, Central-south China**, *Chemosphere* **65**, 1490 - 1499.

**ANEXO A. Concentraciones (ng/L) de contaminantes emergentes en agua superficial, subterránea y potable en diferentes países**

Compuesto  País	AGUA SUPERFICIAL							AGUA SUBTERR			AGUA POTABLE			
	USA	ALEMANI	ESPAÑA <sup>4</sup> BRASIL <sup>3</sup>	AUSTR <sup>5</sup> U.K. <sup>12,16</sup>	SUIZA	FRAN <sup>10</sup> CANA <sup>19</sup>	JAPON <sup>14,21</sup> CHINA <sup>23,24</sup>	MEXICO *	ALEMA <sup>7</sup> USA <sup>25</sup> SUIZA <sup>26</sup>	MEXIC <sup>28</sup>	MEXIC *	USA <sup>20</sup> CHINA <sup>23</sup>	ALEMA <sup>9,15</sup> NETHERL <sup>20</sup>	MEXIC *
Ácido clofibríco	103 <sup>1</sup>	70 <sup>2</sup>	<30 <sup>3</sup>	19-43 <sup>5</sup>	5-25 <sup>6</sup>						29	<270 <sup>15</sup>	2	
Ácido salicílico		30 <sup>2</sup>	18-8800 <sup>4</sup>					1-121		1.2-3.6 <sup>28</sup>	1-738		1-223	
Diclofenaco		150 <sup>2</sup>	31-610 <sup>4</sup> <30 <sup>3</sup>	28-392 <sup>5</sup>	10-150 <sup>6</sup>			29	590 <sup>7</sup>		1-22		0.5	
Gemfibrozil	48 <sup>17</sup> 15 <sup>27</sup>	50 <sup>2</sup>	75-1550 <sup>4</sup>					10			7		0.4-7	
Ibuprofeno	200 <sup>17</sup> 18 <sup>27</sup>	70 <sup>2</sup>	100- 2700 <sup>4</sup>		5-80 <sup>6</sup>			16		0.3-1.5 <sup>28</sup>	0.1-0.5	1000 <sup>20</sup>	23 <sup>20</sup>	0.2-5
Ketoprofeno			17-300 <sup>4</sup>		5 <sup>6</sup>						0.2-7		0.4-1	
Naproxeno	22- 107 <sup>1</sup>	70 <sup>2</sup>	17-2000 <sup>4</sup> <30 <sup>3</sup>	13-38 <sup>5</sup>	10-400 <sup>6</sup>			0.5-183		0.3-1.8 <sup>28</sup>	0.3-9		2-5	
Bisfenol A	140 <sup>17</sup> 1000 <sup>27</sup>	0.5-14 <sup>9</sup> 85-250 <sup>13</sup> <50-272 <sup>18</sup>					2-230 <sup>14</sup>	7		1-3 <sup>28</sup>	0.2-8	22000 <sup>20</sup>	0.5-2.0 <sup>9</sup> <10 <sup>20</sup>	0.2-4
Butilbencilftalato								5-533		2-5 <sup>28</sup>	1-80		1-76	
Diefilhexilftalato	7000 <sup>17</sup>							291-2390		93-104 <sup>28</sup>	19-173		67-4696	
Estradiol	1.9-6.0 <sup>8</sup> <0.1-0.7 <sup>11</sup> 9 <sup>17</sup>	0.15-4 <sup>9</sup>		0.5-7 <sup>16</sup>		1.4-3.2 <sup>10</sup>		6	13-80 <sup>25</sup>	<0.07 <sup>28</sup>		2.3 <sup>20</sup>	0.2-2.1 <sup>9</sup> <0.4 <sup>20</sup>	
Estrona	<0.1-17 <sup>11</sup> 27 <sup>17</sup>	0.10-4 <sup>9</sup>		0.4-12 <sup>12</sup> 0.2-17 <sup>16</sup>		1.1-3.0 <sup>10</sup>				0.2-0.4 <sup>28</sup>	5	21.7 <sup>20</sup>	0.2-0.6 <sup>9</sup> <0.4 <sup>20</sup>	
Etinilestradiol	73 <sup>17</sup>	0.1-5 <sup>9</sup>				1.1-2.9 <sup>10</sup>						<1 <sup>20</sup>	0.15-0.50 <sup>9</sup> <0.4 <sup>20</sup>	
Nonilfenol	800 <sup>17</sup> 110-640 <sup>22</sup>	6.7-134 <sup>9</sup> <33-225 <sup>13</sup> 56-485 <sup>18</sup>				13-920 <sup>19</sup>	<20-300 <sup>21</sup> 100-7300 <sup>23</sup> 290-370 <sup>24</sup>	392-479	200- 760 <sup>26</sup>	1.8-13 <sup>28</sup>	4-128	10- 2700 <sup>23</sup>	2.5-16 <sup>9</sup>	9-108
Pentaclorofenol	2000 <sup>27</sup>													
Triclosan	140 <sup>17</sup> 1000 <sup>27</sup>							17		0.3-1.1 <sup>28</sup>	0.4-13		0.1-7	

[1] Boyd et al. (2003); [2] Ternes et al. (1998); [3] Stumpf et al. (1999); [4] Farré et al. (2001); [5] Ahner et al. (2001); [6] Öllers et al. (2001); [7] Sacher et al. (2001); [8] Dorabawila and Gupta (2005); [9] Kuch and Ballschmiter (2001); [10] Cargouët et al. (2004); [11] Kolodziej et al. (2004); [12] Williams et al. (2003); [13] Heisterkamp et al. (2004); [14] Suzuki et al. (2004); [15] Heberer et al. (2002); [16] Xiao et al. (2001); [17] Kolpin et al. (2002); [18] Bolz et al. (2001); [19] Bennie et al. (1997); [20] Veriefde et al. (2007b); [21] Tsuda et al. (2002); [22] Naylor et al. 2002; [23] Shao et al. (2005); [24] Cheng et al. (2006); [25] Wicks et al. (2004); [26] Ahel et al. (1996); [27] Stackelberg et al. (2004); [28] Silva (2008); [\*] Presente trabajo.

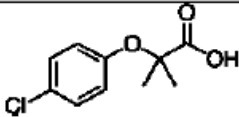
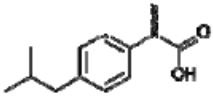
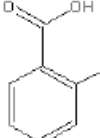
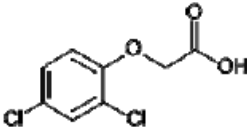
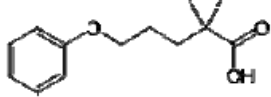
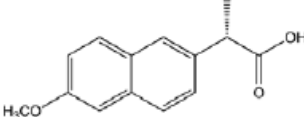
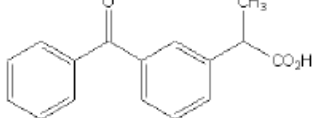
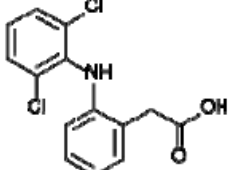

## ANEXO B

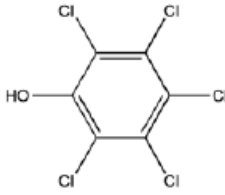
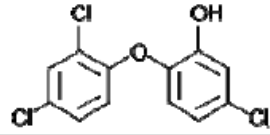
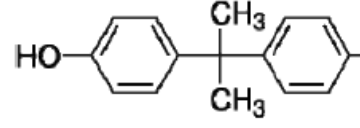
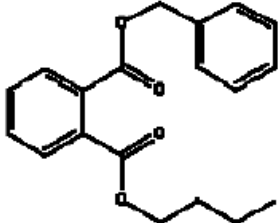
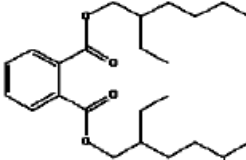
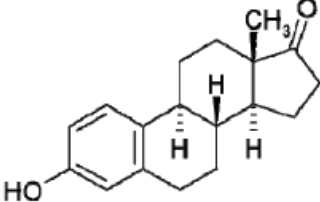
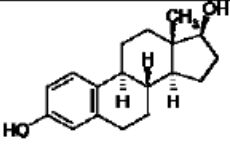
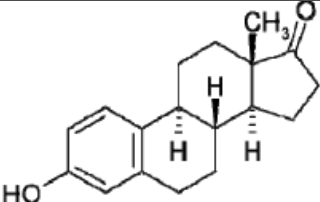
### Descripción de la técnica analítica utilizada para la determinación de contaminantes emergentes.

#### Reactivos y materiales

Los compuestos usados que se describen en la Tabla B.1 así como los estándares de recuperación 4-*n*- nonilfenoles y el estándar interno [2H16] bisfenol A fueron adquiridos de Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA). El ácido 3,4-diclorofenoxiacético (3,4-D) y 2,3-diclorofenoxiacético (2,3-D) fueron adquiridos por Riedel-de Haën (Seelze, Alemania). Los estrógenos deuterados [2H4] estrona, [2H4]17β-estradiol y [2H4]17α-etinilestradiol fueron obtenidos por Cambridge Isotopes (Andover, MA, EUA). Los agentes de derivatizantes *N*-*tert*-butildimetilsilil-*N*-metiltri-fluoroacetamida con 1% *tert*butildimetilclorosilano (MTBSFA) así como *N*,*O*-bis(trimetilsilil)trifluoroacetamida (BSTFA) con 1% de trimetilclorosilano (TMSCl) fueron adquiridos de Sigma – Aldrich. Todos los solventes (agua, metanol, acetona, hexano y acetato de etilo) fueron grado HPLC suministrados por Burdick and Jackson (Morristown, NJ, EUA). Los cartuchos de extracción Oasis HLB fueron proveídos por Waters (Milford, MA, EUA).

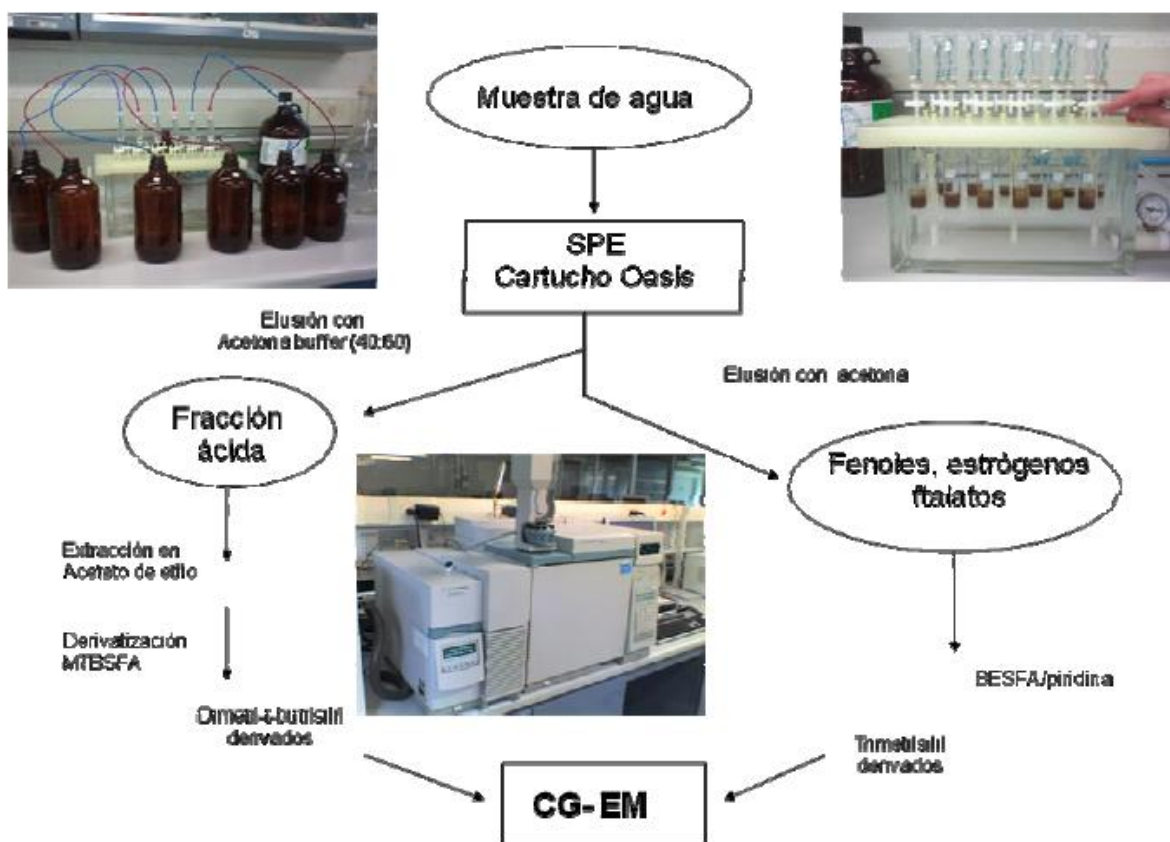
**Tabla B.1 Contaminantes emergentes**

Compuesto	Uso	Formula	Peso molecular g/mol	Log K ow
Ácido clofibrico Ácido 2-(4-Clorofenoxi)-2-metilpropanoico	Regulador de lípidos metabolito del clofibrato		214,65	2.84 (Henschel et al., 1997)
Ibuprofeno ácido 2-[4-(2-metilpropil)fenil]propanoico	analgésico y antiinflamatorio		206,29	3.97 (Avdeef et al., 1998)
Ácido salicilico Ácido 2-hidroxibenzoico	metabolito del ácido acetilsalicilico		138.12	2.24 (S.G. Machatha y S. H. Yalkowsky, 2005)
2,4-D ácido 2-(2,4-diclorofenoxiacético)	pesticida		221,04	2.81 (U.S. DHHS., 1993)
Gemfibrozil Ácido 5-(2,5-dimetilfenoxi)-2,2-dimetil-pentanoico	regulador de lípidos		250.333	6.72 (Hassan et al., 2004)
Naproxeno Ácido (αS)-6-metoxi-α-metil-2-naftalenacético	analgésico y antiinflamatorio		230,26	3.06 (X. Liu et al., 2004)
Ketoprofeno Ácido 2-(3-benzoilfenil)propanoico	analgésico y antiinflamatorio		254.281	2.77 (X. Liu et al., 2004)
Diclofenaco ácido 2-(2-(2,6-diclorofenilamino)fenil)acético	antiflogístico		296.148	4.51 (Avdeef et al., 1998)
4-nonilfenol	químico industrial, metabolito de los alquilfenoles etoxilados (surfactantes)		220.351	4.6 (J.Fenjin et al., 2005)

Compuesto	Uso	Formula	Peso molecular g/mol	Log K ow
Pentaclorofenol 2,3,4,5,6- Pentaclorofenol	pesticida		266,34	5,24 (Schellenberg et al., 1984)
Triclosan 5-cloro-2-(2,4- diclorofenoxi) fenol	antiséptico		289,55	4,76 (MITI, 1992)
Bisfenol A 4,4'-dihidroxi-2,2- difenilpropano	químico industrial		228,28	3,4 (Institute for Health, 2003)
Butilbencilftalato (BuBeP) n-butil bencil ftalato (BBP)	plastificante		312,361	4,77 (Ellington y Floyd., 1996)
Bis-2-etilhexilftalato (DEHP)	plastificante		390,56	7,54 (Ellington y Floyd., 1996)
Estrona 3-hidroxi-13-metil- 6,7,8,9,11,12,13,14,15, 16- decahidrociclopent a[a]fenantreno- 17- ona	estrógeno natural		270,36	3,43 (K.M. Lai, et al., 2000)
17- β-estradiol (8R,9S,13S,14S,17S)- 13-metil- 6,7,8,9,11,12,14,15,16, 17-decahidro ciclopenta[a]fenantr eno-3,17-diol	estrógeno natural		272,39	3,94 (K.M. Lai, et al., 2000)
17- α-efinilestradiol 17-etinil-13-metil- 7,8,9,11,12,13,14,15,1 6,17- decahidro-6H- ciclopenta[a] fenantreno- 3,17-diol	estrógeno sintético		296,41	3,9 (K.I.E. Holthaus, et al., 2002)



En la figura B.1 se presenta un esquema del procedimiento general para el tratamiento de las muestras. Las diferentes etapas del proceso se describen a continuación.



**Figura B.1 Representación esquemática del método analítico**

## Extracción

Las muestras fueron acidificadas a pH 2 con ácido sulfúrico (98%) y fortificadas con los compuestos de interés a las concentraciones que se indican a continuación: 4-nonilfenoles, bisfenol-A, butibencilftalato (BuBeP) y bis-2-etilhexilftalato (DEHP): 25 ng/L (bajo) y 100 ng/L (alto); pentaclorofenol(PCP), triclosan y estrógenos: 5 ng/L (bajo) y 25 ng/L (alto). Se adicionaron los estándares de recuperación donde las cantidades fueron 4-*n*-nonilfenol (100 ng), 3,4-D (100

ng) y [2H4] estrona (5 ng). Para cada muestra se acondicionó un cartucho Oasis HLB (200 mg) con acetona (2x 5 mL) seguido por agua (5 mL). Las muestras se pasaron a través del cartucho a una velocidad de aproximadamente 10 mL/min usando vacío. Al término de la extracción, los cartuchos se lavaron con agua de grado HPLC (2 mL) y posteriormente se eluyeron con 5 mL de la solución 40:60 de una mezcla acetona: buffer 0.10 M de bicarbonato de sodio (ajustado el pH a 10 con una solución 1.0 M de hidróxido de sodio). Esta fracción contiene los compuestos ácidos. Los cartuchos se lavaron con 2 mL de agua grado HPLC y se secaron bajo corriente de vacío por dos horas. Finalmente fueron eluidos con 5 mL de acetona. Esta fracción contiene los potenciales disruptores endocrinos.

### **Procedimiento de derivatización**

La fracción ácida se evapora por 15 minutos bajo corriente de nitrógeno para remover una porción de la acetona presente, acidificar a pH de 2 con ácido sulfúrico y extraer los ácidos en acetato de etilo (2 x 2 mL). Los remanentes de agua se eliminan con sulfato de sodio anhidro. Se adiciona el 2,3-D como estándar interno (100 ng). La muestra se evapora a sequedad bajo corriente de nitrógeno a temperatura ambiente. Los residuos son reconstituidos en acetato de etilo (25 µL) y se adiciona MTBSTFA (25 µL). Los derivados N-tert-butildimetilsilil se generaron por reacción a 60 °C durante 30 minutos. Los extractos fueron inyectados directamente al cromatógrafo.

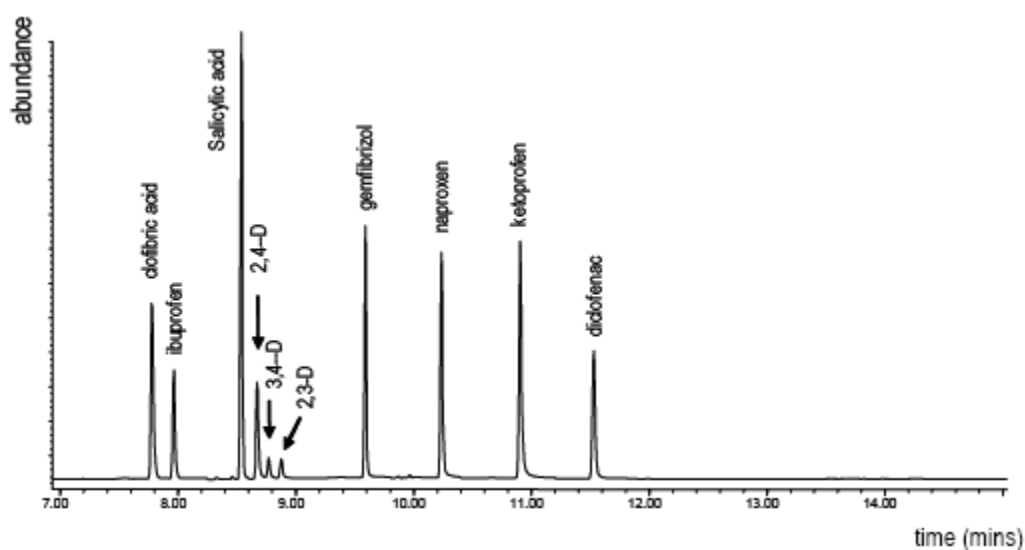
La fracción en acetona, que contiene los demás analitos, se evaporó hasta aproximadamente 200 µL y se adicionó 1 mL de acetato de etilo. El agua remanente se eliminó adicionando sulfato de sodio anhidro. Posteriormente se adicionaron los estándares internos: [2H16] bisfenol A (100 ng), [2H4]17β-estradiol (5 ng) y [2H4]17α-etinilestradiol (5 ng). La muestra se evaporó a sequedad bajo corriente de nitrógeno a temperatura ambiente. Se adicionó piridina (15 µL) y BSTFA (35 µL). Los derivados trimetilsilil se formaron por reacción a 60 °C durante 30 minutos. Los extractos se inyectaron directamente al cromatógrafo.

## **Análisis mediante cromatografía de gases con espectrometría de masas**

Los análisis se realizaron mediante cromatografía de gases con detector selectivo de masas. El equipo consiste en un cromatógrafo Agilent Modelo 6890N acoplado a un detector selectivo de masas Agilent modelo 5973N. Se utilizó una columna capilar Agilent HP5 (30 m, 0.25 mm de diámetro interno, 0.25  $\mu\text{m}$  de película). El gas portador fue He a flujo constante de 1.0 mL/min. Se utilizó la técnica de inyección splitless para inyectar 1  $\mu\text{L}$  de muestra, la temperatura de puerto de inyección fue de 250 °C para el análisis de todos los compuestos, y las rampas de temperatura fueron las siguientes: 100°C por 1 minuto; 20°C por minuto hasta 280°C; 280°C por 10 minutos; tiempo total 20 minutos. El detector fue usado en el modo de ión selectivo (SIM). La temperatura de la fuente de impacto electrónico fue de 230 °C con energía de 70 eV. La temperatura del cuadrupolo fue de 150 °C y la temperatura de interface con el cromatógrafo fue de 280 °C. El instrumento fue auto calibrado con perfluorotributilamina. Los iones de cuantificación y confirmación monitoreados se detallan en las tablas B.2 y B.3 y en las figuras B.2 y B.3 se observa los cromatogramas de los estándares de los analitos respectivos. Los diferentes compuestos analizados se han dividido en compuestos ácidos y compuestos potencialmente disruptores endocrinos.

**Tabla B.2 Iones característicos y tiempos de retención de los ácidos, usando las condiciones de GC-MS descritas**

Analito	Uso	Tiempo de retención (min)	Iones característicos (m/z)
Acido clofibrico	Metabolito del regulador de lípidos clofibrato	7.78	271, 243, <b>143</b>
ibuprofeno	Analgésico y antiinflamatorio	7.97	<b>263</b> , 264
Acido salicílico		8.55	310, <b>309</b> , 195
2,4-D	Metabolito del analgésico aspirina	8.64	
gemfibrozil	Pesticida	9.60	307, <b>243</b> , 179
naproxeno	Regulador de lípidos	10.22	344, <b>287</b> , 185
ketoprofeno	Analgésico y antiinflamatorio	10.90	312, <b>311</b> , 295
diclofenaco	Analgésico y antiinflamatorio	11.52	354, <b>352</b> , 214
3,4- D	Antiflogístico	8.77	251, <b>277</b> , 279
2,3- D	Estándar de recuperación	8.88	219, <b>277</b> , 279
	Estándar interno		



**Figura B.2 Cromatograma de estándares para fracción ácida**

**Tabla B.3 Iones característicos y tiempos de retención de los disruptores endocrinos potenciales, usando las condiciones de GC –MS descritas**

Analito	Uso	Tiempo de retención (min)	Iones característicos (m/z)
4-nonilfenoles	Compuesto químico	7.30→7.70	<u>221</u> , 207, 193
pentaclorofenol (PCP)	industrial	8.17	338, 325, <u>323</u>
triclosan	Pesticida	9.43	362, 360, <u>200</u>
bisfenol-A	Antiséptico	9.75	372, <u>357</u>
butibencilftalato	Compuesto químico	9.60	91, <u>149</u> , 206
(BuBeP)	industrial	10.22	<u>149</u> , 167, 279
bis-2-etilhexilftalato	Plastificante	12.17	<u>342</u> , 257, 218
(DEHP)	Plastificante	12.45	<u>416</u> , 285
estrona	Plastificante	13.453	440, <u>425</u> , 285
17β-estradiol	Estrógeno natural	8.30	<u>179</u> , 292
17α-etinilestradiol (EE2)	Estrógeno natural	9.72	<u>386</u> , 368, 217
4-n-nonilfenol	Estrógeno artificial	12.15	261, <u>346</u>
[ <sup>2</sup> H <sub>18</sub> ] bisfenol A	Estándar de	12.43	420
[ <sup>2</sup> H <sub>4</sub> ] estrona	recuperación	13.44	<u>429</u> , 444
[ <sup>2</sup> H <sub>4</sub> ]17β-estradiol	Estándar interno		
[ <sup>2</sup> H <sub>4</sub> ]17α-etinilestradiol	Estándar de recuperación		
	Estándar interno		
	Estándar interno		

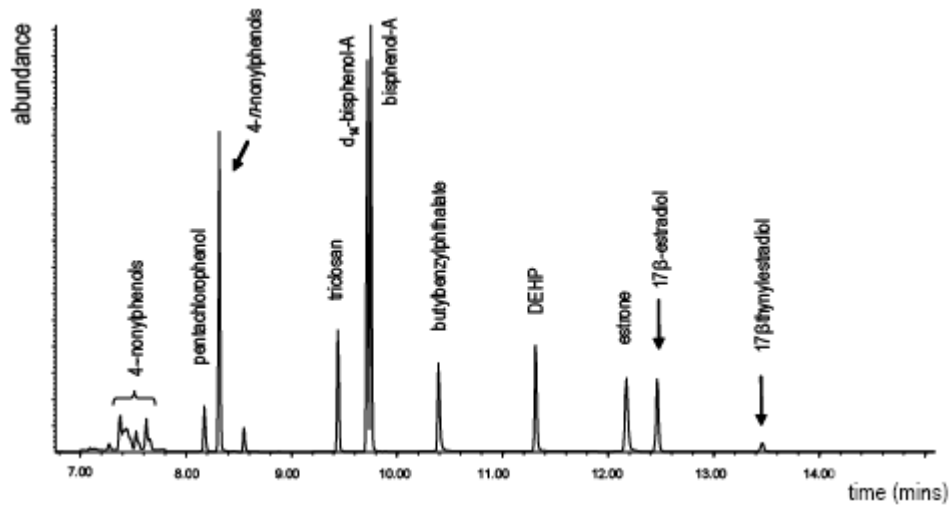

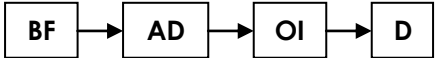




Figura B.3 Cromatograma de estándares para compuestos potencialmente disruptores endocrinos

## ANEXO C

**Tabla C.1 Condiciones del sistema de tratamiento de las plantas potabilizadoras avanzadas monitoreadas**

Planta Potabilizadora	Caudal diseño (l/s)*	Caudal tratado (l/s)*	Sistema de tratamiento	Observaciones
<b>Santa Catarina 13</b>	60	50	 <pre> graph LR     BF[BF] --&gt; FP[FP]     FP --&gt; AD[AD]     AD --&gt; OI[OI]     OI --&gt; D[D]             </pre>	El estado de los equipos es muy bueno. Todos los procesos estaban en operación al momento de la toma de muestra. El ingeniero responsable de la planta estaba muy bien preparado para el buen funcionamiento de la planta.
<b>Sifón</b>	60	60	 <pre> graph LR     BF[BF] --&gt; AD[AD]     AD --&gt; OI[OI]     OI --&gt; D[D]             </pre>	Equipos en buenas condiciones. Al momento de la toma de muestra la planta tenía aproximadamente 3 hrs de haberse puesto en marcha, por cuestiones de mantenimiento; posiblemente afectando los resultados obtenidos.
<b>Santa María Aztahuacán</b>	60	46	 <pre> graph LR     DG[DG] --&gt; FP[FP]     FP --&gt; AD[AD]     OI[OI] --&gt; D[D]             </pre>	La infraestructura del lugar estaba en muy malas condiciones. Así como los equipos que se encontraron percutidos, con la superficie metálica oxidada y bastante empolvados. De todo su sistema de tratamiento solo estaban en operación filtración, adsorción y desinfección al momento de la toma de muestra. La persona responsable de la planta no estaba presente.

BF: biofiltración; DG: degasificación; FP: filtración a presión; AD: adsorción; OI: ósmosis inversa; D: desinfección;  proceso fuera de operación

**Tabla C.1 Condiciones del sistema de tratamiento de las plantas potabilizadoras avanzadas**

<p><b>Agrícola Oriental</b></p>	<p>227</p>	<p>55</p>		<p>Los equipos no presentaban buen estado. Solo estaban en operación filtración, adsorción y desinfección de todo su sistema de tratamiento. La persona responsable no estaba al frente de la planta.</p>
<p><b>Santa Cruz Meyehualco</b></p>	<p>120</p>	<p>60</p>		<p>La infraestructura del lugar estaba en buen estado y las condiciones de los equipos eran tolerables. Ninguno de los procesos estaba en funcionamiento. El tratamiento consistía en la extracción del agua que proviene de los pozos, su circulación por los procesos los cuales se encontraban fuera de operación, y el bombeo hacia la red de distribución donde se dosifica hipoclorito de sodio para su desinfección. La persona responsable de la planta estaba presente.</p>

**DG:** degasificación; **O:** ozonación; **FG:** filtración a gravedad; **AD:** adsorción; **OI:** ósmosis inversa; **D:** desinfección; proceso fuera de operación