



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL PROCESO DE DESINFECCIÓN EN LAS FUENTES
ACTUALES DE SUMINISTRO DE AGUA DEL VALLE DE MÉXICO.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICO DE ALIMENTOS

PRESENTA:
JORGE RAÚL MARTINEZ CHAVARRÍA



MÉXICO, D.F.

AÑO 2009



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: Profesor: MIGUEL ANGEL HIDALGO TORRES

VOCAL: Profesor: JOSE ELIAS BECERRIL BRAVO

SECRETARIO: Profesor: INOCENCIA MA. DE LOURDES FLORES TELLEZ

1er. SUPLENTE: Profesor: GLORIA DIAZ RUIZ

2° SUPLENTE: Profesor: ARGELIA SANCHEZ CHINCHILLAS

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**LABORATORIO DE BIOPROCESOS E INGENIERIA AMBIENTAL, EDIFICIO 5,
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM, CIUDAD UNIVERSITARIA.**

Asesor del tema: JOSE ELIAS BECERRIL BRAVO

Sustentante: JORGE RAÚL MARTINEZ CHAVARRÍA

DEDICATORIA

A Dios

Por haberme dado la oportunidad de nacer, crecer y formar parte de una familia.

A mis padres

Por ser parte fundamental de este trabajo así como su paciencia a lo largo de esta carrera profesional.

Sr. Jorge Martínez, por ser el ejemplo a seguir de cualquier hijo. Gracias por tus consejos y haberme preparado para la vida.

Sra. Aida Chavarría, con tu paciencia y tranquilidad hemos resuelto los problemas que nos rodean por lo que has mantenido a la familia unida.

A mis hermanas

Dolores y Liliana, porque a pesar de chocar en opiniones son las compañeras de familia que cualquier persona querría a su lado, las quiero Mounstrilias.

A mi abuelo

Que donde quiera que te encuentres, este trabajo es muy importante para ambos. Se que estarías contento con este logro.

Y sin más, y muy importante, a la nueva familia que nace para enfrentarse al mundo.

AGRADECIMIENTOS

A la UNAM y Facultad de Química, por dejarme ser parte de su comunidad y a las cuales debo mi formación profesional.

Al Instituto de Ingeniería, por abrirme sus puertas y encontrar todo el apoyo que necesite para este trabajo a través del Fideicomiso del Valle de México, proyecto 6348: "Análisis de la calidad del agua de las fuentes actuales de suministro y revisión de los procesos de potabilización"

A la Dra. Blanca Jiménez, por aceptarme en el selecto Grupo de Tratamiento y Reúso (GTR).

Al M. en I. José Elías Becerril, por el rumbo que tomo esta tesis, así como las observaciones y consejos que llevaron a realizar este trabajo.

Al H. Jurado: Miguel Ángel Hidalgo Torres, Inocencia Ma. De Lourdes Flores Téllez, Gloria Días Ruiz y Argelia Sánchez Chinchillas

A mis compañeros de cubo, porque aunque la lista es extensa, cada uno de ustedes me enseñaron algo nuevo cada vez; hicieron que la estancia en el iingen fuera de lo más agradable y nunca aburrida. ¡Gracias nuevamente compañeros!

CONTENIDO

ABREVIATURAS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	ii
LISTA DE TABLAS.....	iii
RESUMEN.....	iv
OBJETIVOS.....	v
METAS.....	v
ALCANCES.....	vi
I. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Problemática de la ZMCM.....	1
1.2. Descripción de las Fuentes de Abastecimiento.....	1
1.2.1. Fuentes de Abastecimiento externas.....	2
1.2.1.1. El sistema Lerma.....	3
1.2.1.2. El sistema Cutzamala.....	3
1.2.2. Fuentes de Internas de Abastecimiento.....	3
1.2.2.1. Agua subterránea.....	4
1.2.2.2. Agua superficial.....	4
1.3 Contexto de estudio.....	4
II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	11
2.1. Desinfección.....	11
2.1.1. Coliformes Totales.....	11
2.1.2. Coliformes Fecales.....	12
2.2. Características de un desinfectante.....	13
2.3. Desinfección con cloro.....	14
2.3.1. Reacciones del cloro.....	15
2.3.2. Demanda de cloro.....	18
2.4. Modo de acción.....	20
2.5. Ventajas y desventajas.....	20
2.5.1. Costo.....	22
2.6. Subproductos de la cloración.....	22

2.6.1. Trihalometanos.....	22
2.6.1.1. Historia.....	22
2.6.1.2. Definición.....	23
2.6.1.3. Formación de Trihalometanos.....	23
2.6.1.4. Control de Trihalometanos.....	25
III. METODOLOGÍA.....	26
3.1. Ubicación y descripción del sitio.....	26
3.2. Preparación del material.....	26
3.3. Muestreo.....	27
3.4. Técnicas analíticas empleadas.....	30
3.5. Caracterización del agua.....	30
3.6. Base de Datos.....	34
3.7. Resumen de Trabajo.....	34
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1. Resultados en presas.....	36
4.1.1. Cloro residual libre.....	36
4.1.2. Carbono orgánico total.....	37
4.1.3. Trihalometanos totales.....	38
4.1.4. Coliformes totales.....	39
4.1.5. Coliformes fecales.....	40
4.1.6. Nitrógeno Amoniacal.....	41
4.2 Resultados en pozos.....	43
4.2.1. Cloro residual libre.....	43
4.2.2. Carbono orgánico total.....	43
4.2.3. Trihalometanos totales.....	44
4.2.4. Coliformes totales.....	45
4.2.5. Coliformes fecales.....	46
4.2.6. Nitrógeno Amoniacal.....	46
4.3. Resultados en tanques.....	48
4.3.1. Absorbancia UV.....	48

4.3.2. Cloro residual libre.....	49
4.3.3. Carbono orgánico total.....	50
4.3.4. Trihalometanos totales.....	51
4.3.5. Coliformes totales.....	52
4.3.6. Coliformes fecales.....	53
4.3.7. Nitrógeno Amoniacal.....	53
4.4. Resultados en Plantas potabilizadoras.....	54
4.4.1. Absorbancia UV.....	54
4.4.2. Cloro residual libre.....	55
4.4.3. Carbono orgánico total.....	56
4.4.4. Trihalometanos totales.....	57
4.4.5. Coliformes totales.....	57
4.4.6. Coliformes fecales.....	59
4.4.7. Nitrógeno Amoniacal.....	60
4.5. Resultados domiciliarios.....	60
4.5.1. Cloro residual libre.....	61
4.5.2. Carbono orgánico total.....	61
4.5.3. Trihalometanos totales.....	62
4.5.4. Coliformes totales.....	63
4.5.5. Coliformes fecales.....	64
4.5.6. Nitrógeno Amoniacal.....	64
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	66
BIBLIOGRAFIA.....	68
ANEXOS.....	72

ABREVIATURAS

AWWA	<i>American Water Works Association</i>
BDCM	Bromodiclorometano
CF	Coliformes fecales
CNA	Comisión Nacional del Agua
COD	Carbono orgánico disuelto
COT	Carbono orgánico total
CT	Coliformes totales
DBCM	Dibromoclorometano
DPD	<i>NN, dietil-p-fenilendiamina</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
HCl	Ácido clorhídrico
HOCl	Ácido hipocloroso
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i>
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
L	Litro
mg	Miligramo
MON	Materia orgánica natural
NTP	<i>National Toxicology Program</i>
OCl ⁻	Ion hipoclorito
OMS	Organización Mundial de la Salud
SDT	Sólidos disueltos totales
THM	Trihalometanos
THMT	Trihalometanos totales
UFC	Unidades formadoras de colonias
UV	Luz ultravioleta
ZMCM	Zona metropolitana de la Ciudad de México

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Reacciones del cloro en el agua.....	18
Figura 3.1.	Toma de muestra.....	27
Figura 3.2.	Muestreo en Tanque.....	28
Figura 3.3.	Muestra para Trihalometanos.....	28
Figura 3.4.	Muestra para Coliformes Totales y Fecales.....	29
Figura 3.5.	Muestra para Cloro libre.....	29
Figura 3.6.	Muestras para transportar.....	30
Figura 3.7.	Espectrofotómetro para medir Absorbancia UV.....	32
Figura 3.8.	Espectrofotómetro HACH DR500.....	32
Figura 3.9.	Turbidímetro HANNA.....	33
Figura 3.10.	Potenciómetro.....	33
Figura 3.11.	Colorímetro HACH.....	
Figura 4.1.	Cloro libre en presas.....	37
Figura 4.2.	Carbono orgánico total en presas.....	38
Figura 4.3.	Trihalometanos totales en presas.....	39
Figura 4.4.	Coliformes Totales en presas.....	40
Figura 4.5.	Coliformes Fecales en presas.....	42
Figura 4.6.	Nitrógeno Amoniacal en presas.....	42
Figura 4.7.	Cloro libre en pozos.....	43
Figura 4.8.	Carbono orgánico total en pozos.....	44
Figura 4.9.	Trihalometanos totales en pozos.....	45
Figura 4.10.	Coliformes Totales en pozos.....	46
Figura 4.11.	Coliformes Fecales en pozos.....	47
Figura 4.12.	Nitrógeno Amoniacal en pozos.....	47
Figura 4.13.	Absorbancia UV en tanques.....	48
Figura 4.14.	Cloro libre en tanque.....	49
Figura 4.15.	Carbono orgánico total en tanques.....	50
Figura 4.16.	Trihalometanos totales en tanques.....	51
Figura 4.17.	Coliformes Totales en tanques.....	52
Figura 4.18.	Coliformes Fecales en tanques.....	53
Figura 4.19.	Nitrógeno Amoniacal en tanques.....	54
Figura 4.20.	Absorbancia UV en plantas potabilizadoras.....	55
Figura 4.21.	Cloro libre en plantas potabilizadoras.....	55
Figura 4.22.	Carbono orgánico total en plantas potabilizadoras.....	56
Figura 4.23.	Trihalometanos totales en plantas potabilizadoras.....	57
Figura 4.24.	Coliformes Totales en plantas potabilizadoras.....	58
Figura 4.25.	Coliformes Fecales en plantas potabilizadoras.....	59
Figura 4.26.	Nitrógeno Amoniacal en plantas potabilizadoras.....	60
Figura 4.27.	Cloro libre en delegaciones.....	61
Figura 4.28.	Carbono orgánico total en delegaciones.....	62
Figura 4.29.	Trihalometanos totales en delegaciones.....	62
Figura 4.30.	Coliformes Totales en delegaciones.....	63
Figura 4.31.	Coliformes Fecales en delegaciones.....	64
Figura 4.32.	Nitrógeno Amoniacal en delegaciones.....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1.	Abastecimiento de Agua en el Valle de México.....	2
Tabla 1.2.	Concentraciones de SPD Internacionales.....	7
Tabla 2.1.	Comparación de diferentes métodos de desinfección.....	14
Tabla 2.2.	Dosis de Cloro.....	19
Tabla 2.3.	Valores Ct para diferentes organismos empleando cloro.....	20
Tabla 3.1.	Parámetros medidos en campo.....	31
Tabla 3.2.	Parámetros medidos en el laboratorio.....	31

RESUMEN

El presente trabajo de desprende de la preocupación y problemática actual del suministro de agua potable al valle de México, haciendo hincapié a la calidad con que se entrega a los usuarios.

En la actualidad se considera que los procesos de desinfección del agua implican un tratamiento especializado, dirigido a la destrucción de organismos perjudiciales o simplemente, indeseables. La forma más utilizada en este rubro, es la desinfección por cloración.

Diversos autores coinciden la cloración es muy efectiva y tiene un bajo costo, su limitación es que en presencia de materia orgánica (medida como carbono orgánico total, COT) da lugar a la formación de subproductos de la desinfección (SPD), principalmente trihalometanos (THM), los cuales son consideradas carcinógenos.

Los resultados de los muestreos realizados en este trabajo se dividieron en cinco grupos: presas, pozos, tanques, plantas potabilizadoras y domiciliarios. En general, se revela que la calidad del agua suministrada al valle de México es aceptable en cuanto a los parámetros manejados en el presente estudio, como lo son: Cloro libre, Carbono orgánico total, Trihalometanos totales, Coliformes totales, Coliformes fecales y Nitrógeno amoniacal.

Finalmente, se recomienda estandarizar la dosificación del cloro, para que se mantenga el residual de cloro a lo largo de toda la red de distribución hasta el consumidor final.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la eficiencia de la desinfección (cloración) actualmente utilizado en la producción de agua potable en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y la potencial formación de subproductos.

Objetivo particular

- Caracterizar el agua que se obtenga de los muestreos y relacionar los parámetros involucrados para la potencial formación de Trihalometanos, así como los indicadores para la evaluación de una correcta desinfección.

METAS

- Clasificar las fuentes de suministro de agua de la Ciudad de México de acuerdo con su grado y problemas de contaminación con respecto a las concentraciones iniciales de THM
- Determinar en forma teórica qué modificaciones deben sufrir el proceso de cloración para lograr la producción de un agua potable y segura para el consumidor final.
- Determinar la cantidad de cloro libre residual que llega a los consumidores (casa habitación), y la relación de THM.
- Relacionar el efecto de parámetros fisicoquímicos y la potencial formación de THM.

ALCANCES.

- El estudio solo contempla la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).
- Los muestreos se realizaron en la época de estiaje.
- La evaluación de la eficiencia del sistema de desinfección estará basada en los resultados de coliformes totales, fecales y cloro residual, de acuerdo a la normatividad vigente (NOM-127-SSA1-1994).
- La evaluación de los THM se determinará como concentración de THM totales, que no exceda lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994.
- Los muestreos a casa habitación se limitarán a solo siete puntos del Distrito Federal.

I. ANTECEDENTES

I.1. Problemática de la ZMCM

Los cuerpos de agua a lo largo de la historia se han utilizado para abastecer poblaciones de agua para consumo humano, así como para eliminar sus propios desechos, lo que ha provocado que con el paso del tiempo la cantidad y tipo de residuos que se liberan en los cursos de agua se hayan incrementado y diversificado, al mismo tiempo que la calidad original del agua se ha degradado transformándose en origen y vehículo de diversas enfermedades.

En la Ciudad de México, donde el desmedido crecimiento de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) ha generado problemas de diversa índole para abastecer las necesidades de su población. De entre ellas, destaca la necesidad de abastecer de agua potable a una población cercana a los 20 millones de habitantes (INEGI, 2007), lo que ha generado a través del tiempo, entre otras cosas, la sobreexplotación del acuífero.

Las autoridades gubernamentales han prestado atención a este crecimiento, proporcionando los servicios urbanos desde la perspectiva de la oferta, es decir, buscando siempre nuevas fuentes de suministro para cumplir con los crecientes requerimientos de servicios en la Ciudad de México; siendo la distribución del agua el servicio más demandante; actualmente en México se abastece de agua potable al 85 % de la población. (CNA, 2006).

I.2. Descripción de las Fuentes de Abastecimiento

Los cuerpos de agua naturales en el Distrito Federal han casi desaparecido. Hoy en día, todo lo que queda 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 Tlaxiatemalco y una presa en Zumpango (Cohen, *et. al.*, 2005).

La Tabla 1.1 resume las diferentes fuentes de abastecimiento en la ZMCM.

FUENTE	GASTO m ³ /s
POZOS DEL VALLE	42.5
CUTZAMALA	15
LERMA	5
FUENTES SUPERFICIALES.	1.5
TOTAL	64

Tabla 1.1. Abastecimiento de Agua en el Valle de México.

1.2.1. Fuentes de Abastecimiento Externas

El primer sistema externo en aportar agua al Valle de México fue el Lerma, ubicado en el Estado de México a 62 km de la ciudad de México. Debido a la sobreexplotación del Lerma, y a la constante demanda de agua por parte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), fue necesario traer agua de fuentes aun más lejanas, por lo que en 1982 se inicio la importación de agua del Sistema Cutzamala, a 130 km de la ZMCM (Álvarez, 2009).

1.2.1.1. El Sistema Lerma

El sistema Lerma se encuentra en el Valle de Toluca, al poniente de la ciudad de México ocupando aproximadamente un área de 2,236 km².

Ya que el agua es extraída directamente del acuífero de la región, y en general su calidad es considerada como buena, no existe una planta de potabilización; sin embargo, a lo largo de su trayecto hasta la ZMCM es clorada hasta los tanques de almacenamiento de Dolores en Chapultepec; posteriormente, es clorada para su distribución en la red de abastecimiento (Castelan, 2002).

1.2.1.2. Sistema Cutzamala

El sistema Cutzamala aprovecha las aguas de la cuenca alta del río Cutzamala, provenientes de las presas Tuxpan y El Bosque, en el Estado de Michoacán; Colorines, Ixtapan de Oro, Valle de Bravo y Villa Victoria en el estado de México que antes formaban parte del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, así como de la presa Chilesdo (Sistema Cutzamala, 2005).

El sistema Cutzamala abastece al Distrito Federal y al Estado de México, constituyéndose así como uno de los sistemas de suministro de agua potable más grandes del mundo, no solo por la cantidad de agua que transporta (aproximadamente 480.7 millones de metros cúbicos anualmente), si no por el desnivel (1, 100m) que se vence.

1.2.2. Fuentes Internas de Abastecimiento

Las fuentes internas corresponden esencialmente a la extracción del agua del acuífero a través de los pozos distribuidos en la ZMCM, contribuyendo con el 65% del agua suministrada; con respecto a las fuentes internas-superficiales de la cuenca, estas corresponden a los manantiales y a los ríos que aún subsisten en el territorio (Álvarez, 2009).

1.2.2.1. Agua Subterránea

El agua subterránea proviene de la precipitación que se infiltra a través del suelo hacia los estratos porosos y en ocasiones los satura. 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).

El principal sistema acuífero de la cuenca se compone de sedimentos aluviales y volcánicos, de 100 a 500 m de espesor, cubiertos por arcillas lacustres. Este sistema puede ser dividido en subsistemas interconectados (acuíferos) desde los que se suministra la mayor parte del agua a la zona metropolitana; los sistemas acuíferos son:

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

1.2.2.2. Agua superficial

El aporte de las fuentes superficiales que aún subsisten en la ZMCM son el Río Magdalena, la Presa Madín en el Río Tlalnepantla, los manantiales del Desierto de los Leones y el actual humedal de Xochimilco, con una contribución total de 1 m³/s.

1.3. Contexto de Estudio

De estas fuentes de abastecimiento, la prioridad sanitaria se enfoca a garantizar una adecuada calidad en agua potable, puesto que es el vehículo más importante para la transmisión de enfermedades gastrointestinales, principalmente de fiebre tifoidea y paratifoidea, salmonelosis, disentería, cólera y parasitosis; la forma más eficiente para prevenir estas infecciones es la desinfección del agua, y la forma mas económica es el uso de cloro (CNA, 2006).

Este compuesto destruye los organismos al inactivarlos, atravesando la membrana celular; además de ser efectivo, la desinfección por medio de la cloración es relativamente barato, y el uso de solo un pequeño exceso de este compuesto, suministra al agua de un potencial de desinfección residual que permanece durante su almacenamiento y posterior distribución al consumidor.

La desinfección con cloro se reconoce como uno de los mayores logros en el campo de salud pública. Sin embargo, la disponibilidad de infraestructura para la desinfección no garantiza que el usuario reciba un agua con calidad adecuada; es necesario mantener niveles apropiados de cloro residual libre a lo largo del sistema de distribución y hasta la toma domiciliaria de la población. Es

decir, la prevención de enfermedades gastrointestinales, asociadas al agua, enfrenta el reto de garantizar un proceso eficiente de desinfección.

En México, la secretaria de salud pública recomendó la cloración como medida preventiva desde la década de 1970, y se ha generalizado como método de desinfección; el cual ha sido empleado de manera totalmente inconsciente por la población en general, debido a que ha sido usada en cantidades totalmente arbitrarias, debido a la poca o nula información existente de los efectos que este agente puede provocar sobre el organismo.

Los agentes comúnmente usados para la desinfección del agua es el ácido hipocloroso (HClO), hipoclorito de sodio (NaClO) e hipoclorito de calcio (CaClO) (CNA, 2006).

Con respecto a los sistemas de desinfección, en la ZMCM los sistemas de potabilización emplean la desinfección con cloro, este método presenta la ventaja de ser de fácil aplicación y más económico que otros métodos como la ozonación y la desinfección con radiación UV (Trujillo, 2006); adicionalmente, como ya se había mencionado, el cloro proporciona una protección residual contra la contaminación microbiológica dentro de la red de distribución y hasta su arribo al consumidor final. En este contexto, la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece un rango de concentración de cloro residual libre de 0.2 – 1.5 mg/l para garantizar que el agua será agradable a los sentidos y no causará efectos nocivos a la salud del consumidor.

Para asegurar la eficiencia en la desinfección, es necesario aplicar dosis de cloro por encima del punto de quiebre con residuales de cloro adecuados mediante ensayos de demanda de cloro, bioensayos de dosis-respuesta bacteriana, o análisis de nitrógeno orgánico. Estos ensayos se realizan en laboratorio, permiten optimizar el uso del cloro y mejoran los procesos de pre cloración con el empleo de dosis estándar.

A pesar de las ventajas que presenta el cloro, se ha observado que en presencia de materia orgánica, medido como carbono orgánico total (COT), da

lugar a la formación de los denominados subproductos de la desinfección (SPD), entre los que resaltan los trihalometanos (THM), (Owen, 1995).

Los subproductos de la desinfección se forman durante el proceso de desinfección por la reacción de los desinfectantes con la materia orgánica que contiene las fuentes de agua. Dependiendo del tipo de desinfectante que se utilice se producen diversos tipos de subproductos. Específicamente en el caso de la desinfección con cloro se producen comúnmente trihalometanos, ácidos haloacéticos, acetonitrilos halogenados, cetonas cloradas, furanonas cloradas y halidos cianógenos.

En los años treinta, desde que se identificaron los THM como SPD en agua potable, se han realizado considerables esfuerzos en la investigación que se han dirigido a aumentar el conocimiento de la formación de los SPD, presencia y efectos a la salud.

Aunque más de 600 SPD has sido reportados en la literatura, solamente un pequeño grupo ha sido evaluado tanto en estudios cuantitativos como sus efectos en la salud (Richardson, 1998).

En la Tabla 1.2 se muestra las diferentes concentraciones establecidas por diferentes organismos Internacionales respecto a diferentes SPD.

Tabla 1.2

EPA	Concentración (mg/L)
THMs totales	0.080
Ácidos haloaceticos	0.060
ión BrO_3^-	0.010
ión ClO_2^-	1.0
OMS	Concentración (mg/L)
Cloroformo	0.2
Bromodiclorometano	0.06
Clorodibromometano	0.1
Bromoformo	0.1
Ácido dicloroacético	0.05

Ácido tricloroacético	0.2
ión BrO_3^-	0.01
ión ClO_2^-	0.7
Tricloroacetaldehído	0.01
Dicloroacetoniitrilo	0.02
Dibromoacetoniitrilo	0.07
2,4,6-Triclorofenol	0.2
Formaldehido	0.9
Unión Europea	Concentración (mg/L)
THMs totales	0.1
ión BrO_3^-	0.01

Fuente: Richardson, *et. al.*, 2007.

Otros países, además de los Estados Unidos, han regulado los SPD como por ejemplo México. Sin embargo, en México aún se esta lejos de identificar y clasificar cada uno de los SPD reportados hasta ahora. Puesto que, la NOM-127-SSA1-1994 solo menciona una concentración máxima de 0.2 mg/L de THM totales.

Algunos estudios recientes indican que puede existir una relación causal entre la desinfección con cloro y la salud reproductora (disminución en la fertilidad, parto prematuro) o fetal (lesión en el desarrollo fetal dentro del útero), bajo peso al nacimiento, defectos del tubo neural y abortos espontáneos; otros estudios señalan que puede traer efectos negativos a largo plazo, como cáncer (Hard *et. al.*, 2000; Jiménez *et. al.*, 2004).

Richardson (1998), habla que los THM son preocupantes por ser tóxicos a la salud ya que actúan como depresores del sistema nervioso central y afectan las funciones del hígado y riñones.

Los THM son definidos como: Cloroformo, Bromoformo, Bromodiclorometano y Dibromoclorometano (EPA, 1979).

En este contexto, de acuerdo a la revisión toxicológica (OMS, 2004) de los THM, se tiene que:

Cloroformo

El peso de evidencia para la genotoxicidad del cloroformo se considera negativo. El efecto tóxico más observado del cloroformo es el daño a la región centrilobular del hígado. La severidad de estos efectos por unidad de dosis administrada depende de la especie, del vehículo y del método por los cuales el cloroformo es administrado.

Bromoformo

En una prueba biológica del programa de toxicología nacional (NTP, por sus siglas en inglés), el bromoformo indujo un pequeño aumento en tumores relativamente raros del intestino grueso en las ratas de ambos sexos pero no indujo tumores en ratones. Los datos de una variedad de análisis sobre la genotoxicidad del bromoformo son ambiguos. La agencia internacional para la investigación sobre el cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) ha clasificado el bromoformo en el grupo 3 (no clasificable en cuanto a su potencial carcinógeno a los seres humanos).

Dibromoclorometano (DBCM)

En una prueba biológica del NTP, el DBCM indujo tumores hepáticos en hembras y posiblemente en los ratones machos pero no en ratas. La genotoxicidad de DBCM se ha estudiado en un número de análisis, pero los datos disponibles se consideran poco concluyentes. La IARC ha clasificado al DBCM en el grupo 3 (no clasificado en cuanto a su potencial carcinógeno a los seres humanos).

Bromodiclorometano (BDCM)

La IARC ha clasificado al BDCM en el grupo 2B (posiblemente carcinógeno a los seres humanos). En una prueba biológica del NTP, el BDCM indujo adenomas y adenocarcinomas renales en ambos sexos de ratas y ratones machos, tumores raros del intestino grueso en ambos sexos de ratas y adenomas y adenocarcinomas hepatocelulares en ratones hembras.

Debido a lo anterior. La OMS (2004) menciona los siguientes valores guías para cada THM: cloroformo 200 µg/L; bromoformo 100 µg/L, dibromoclorometano (DBCM) 100 µg/L y bromodichlorometano (BDCM) 60 µg/L.

Sin embargo, aún existen muchas preguntas respecto a los efectos tóxicos de la exposición a los compuestos derivados de la desinfección con cloro. En tanto continúan las investigaciones, algunos organismos han recomendado reducir el nivel máximo aceptable de THMs en agua potable de 0.100 mg/L a 0.080 mg/L (EPA, 1999) con el fin de establecer niveles seguros o aceptables de ingestión diaria.

La normatividad mexicana (NOM-127-SSA1-1994) menciona un límite de 0.20 mg/L como concentración máxima aceptable de trihalometanos totales (THMT).

Por otra parte, la presencia de microorganismos patógenos y parásitos en el agua causantes de enfermedades, tiene diversas causas entre las que se encuentran la mala calidad del agua de la fuente de abastecimiento, el desconocimiento de la contaminación biológica inicial del sistema de distribución, escurrimientos de agua contaminada hacia los mantos freáticos, las deficiencias en la potabilización del agua, o bien, la falta de higiene de los usuarios. En este caso de contaminación por agentes biológico – infecciosos un eficiente sistema de desinfección asegurará la calidad microbiológica apropiada para consumo humano.

Finalmente, cabe mencionar que el sistema de desinfección empleado en las plantas de potabilización en la ZMCM, se diseñó partiendo de una calidad del agua que, como ya fue mencionado, se ha modificado debido a las diversas actividades humanas que se llevan a cabo en ésta región. Por lo anterior, el presente trabajo de tesis evaluará la eficiencia de la desinfección llevada a cabo en las fuentes actuales de suministro, y su potencial formación de subproductos.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Desinfección

Las enfermedades relacionadas con el agua son una tragedia humana que cada año causan la muerte a más de 5 millones de personas (10 veces más que las víctimas de guerra). Aproximadamente 2,300 millones de personas padecen enfermedades relacionadas con el agua y un 60% de la mortalidad infantil mundial es causado por enfermedades infecciosas y parasitarias, relacionadas la mayoría con el agua (UNESCO, 2003).

Según la NOM-127-SSA1-1994, que a la letra define desinfección como: la destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos. Esta definición debe cumplirse en la etapa final de todo tratamiento de agua.

De acuerdo con esta definición, los microorganismos coliformes se encuentran dentro del grupo de los organismos patógenos, luego entonces para una correcta desinfección es necesario evaluar la presencia de estos microorganismos en las fuentes de suministro.

2.1.1 Coliformes totales

Este grupo de microorganismos incluye una amplia variedad de bacilos aerobios y anaerobios facultativos, gramnegativos y no esporulantes capaces de proliferar en presencia de concentraciones relativamente altas de sales biliares fermentando la lactosa y produciendo ácido o aldehído en 24 h a 35–37 °C. Los coliformes totales producen, para fermentar la lactosa, la enzima β -galactosidasa. Tradicionalmente, se consideraba que las bacterias coliformes pertenecían a los géneros *Escherichia*, *Citrobacter*, *Klebsiella* y *Enterobacter*, pero el grupo es más heterogéneo e incluye otros géneros como *Serratia* y *Hafnia*. El grupo de los coliformes totales incluye especies fecales y ambientales. Además, se anexan microorganismos que pueden sobrevivir y proliferar en el agua. Por consiguiente, no son útiles como índice de agentes patógenos fecales, pero pueden utilizarse como indicador de la eficacia de tratamientos y para evaluar la limpieza e integridad de sistemas de distribución y la posible presencia de biopelículas. No obstante, hay mejores indicadores

para estos fines. El análisis de los coliformes totales, como indicador de desinfección, es mucho más lento y menos fiable que la medición directa de la concentración residual de desinfectante. Además, los coliformes totales son mucho más sensibles a la desinfección que los protozoos y virus entéricos. La NOM-127-SSA1-1994 establece un máximo de 2 UFC/100ml para agua potable.

Fuentes y prevalencia

Las bacterias pertenecientes al grupo de los coliformes totales (excluida *E. coli*) están presentes tanto en aguas residuales como en aguas naturales. Algunas de estas bacterias se excretan en las heces de personas y animales, pero muchos coliformes son heterótrofos y capaces de multiplicarse en suelos y medios acuáticos. Los coliformes totales pueden también sobrevivir y proliferar en sistemas de distribución de agua, sobre todo en presencia de biopelículas.

2.1.2 Coliformes Fecales

Estos organismos son un subgrupo de los coliformes totales, capaz de fermentar la lactosa a 44.5°C. Aproximadamente el 95% del grupo de coliformes presentes en heces, están formados *Escherichia coli* y ciertas especies de *Klebsiella*. Ya que los coliformes fecales se encuentran casi exclusivamente en las heces de animales de sangre caliente, se considera que reflejan mejor la presencia de contaminación fecal (Madigan, *et. al.*, 2004).

La NOM-127-SSA1-1994 establece un máximo de Cero UFC/100ml para agua potable.

Fuentes y prevalencia

La capacidad de reproducción de los coliformes fecales fuera del intestino de los animales homotermos es favorecida por las condiciones adecuadas de materia orgánica, pH, humedad, temperatura, etc. También pueden reproducirse en las biopelículas que se forman en las tuberías de distribución de agua potable (CYTED, 2003).

2.2 Características en un desinfectante

Sin embargo, para que un desinfectante sea considerado como ideal debe cumplir con los siguientes requisitos (Fonseca, 2004):

- Debe poder destruir o inactivar, dentro de un tiempo dado, las clases y números de microorganismos patógenos que pueden estar presentes en el agua que se va a desinfectar.
- El análisis para determinar la concentración del desinfectante en el agua debe ser exacto, sencillo, rápido y apropiado de hacerlo *in situ* como en el laboratorio.
- El desinfectante debe ser fiable para usarse dentro del rango de condiciones que podrían encontrarse en el abastecimiento de agua.
- Debe poder mantener una concentración residual adecuada en el sistema de distribución de agua para evitar la recontaminación o que los microorganismos se reproduzcan.
- De ser posible no debe introducir, ni producir sustancias tóxicas o, en caso contrario, éstas deben mantenerse bajo valores o normas establecidas, de modo que no altere de ninguna forma las características del agua de modo que no sea apta para consumo humano, o sea estéticamente inaceptable para el consumidor.
- El costo del equipo, su instalación, operación, mantenimiento y reparación, así como la adquisición y el manejo de los materiales requeridos para sustentar permanentemente una dosificación eficaz, debe ser razonable.

La Tabla 2.1 se resume la evaluación de algunas de las características mencionadas anteriormente para los desinfectantes más comunes:

Tabla 2.1 Comparación de diferentes métodos de desinfección

Característica	Cloro	Hipoclorito de sodio	Hipoclorito de calcio	Ozono	UV
Disponibilidad	Bajo costo	Moderadamente a bajo costo	Moderadamente a bajo costo	Moderadamente a alto costo	Moderadamente a alto costo
Toxicidad a microorganismos	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Solubilidad ¹	ligera	Alta	Alta	Baja	NA
Estabilidad	Estable	Ligeramente	Relativamente	Inestable, debe	Debe generarse

		estable	estable	generarse a medida que se consume	al usarse
Homogeneidad	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo	NA
Interacción con materia extraña	Oxida materia orgánica	Oxidante activo	Oxidante activo	Oxida materia orgánica	Moderada
Penetración	Alta	Alta	Alta	Alta	Moderada
Corrosión	Altamente corrosivo	Corrosivo	Corrosivo	Altamente corrosivo	NA

¹ Debe ser soluble en agua o tejido celular

NA: No aplica

Fuente: Werf (1995) y Metcalf y Eddy (2003).

2.3 Desinfección con cloro

La cloración del agua es el método de desinfección dominante tanto en México como el resto del mundo, debido a que contribuye eficientemente a la reducción y el control de las enfermedades hídricas, control del olor y sabor, prevención del crecimiento de algas, oxidación del hierro y manganeso, efecto residual, entre otros (Caceres, 1990; White, 1992).

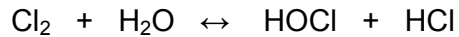
A través del tiempo el cloro se ha acreditado como el más eficaz de los medios utilizados en la desinfección del agua, bien sea directamente o en forma de compuestos que lo contienen. El desarrollo experimentado durante los últimos cincuenta años en los métodos y equipos utilizados a este fin, ha facilitado su adopción con carácter general para el tratamiento de agua. En México, en la NOM-127-SSA1-1994, se establece el empleo del cloro como un proceso para la desinfección del agua potable.

2.3.1 Reacciones del cloro.

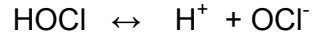
Cuando el cloro es añadido al agua sufre varias reacciones las cuales se explican a continuación:

Hidrólisis

El cloro reacciona con el agua, para formar el ácido hipocloroso (HOCl) y el ácido clorhídrico (HCl) según la reacción:



Esta reacción de hidrólisis que se produce en fracciones de segundo, es reversible, además, el cloro como ácido hipocloroso, se disocia en iones de hidrógeno e iones de hipoclorito (OCl^-), según la ecuación reversible:



Estos compuestos de cloro que existen en el agua como ácido hipocloroso (HOCl) e ión hipoclorito (OCl^-) se les llama cloro activo libre. El (HOCl) es mucho más eficaz como desinfectante que el ión (OCl^-) el que para los efectos prácticos no se le considera como desinfectante.

Sin embargo, las reacciones anteriores dependen del pH del agua. Así, la primera predomina con valores bajos de pH y la segunda con valores altos. Las cantidades de ácido hipocloroso y de iones de hipoclorito formadas en las reacciones anteriores, equivalen en capacidad oxidante a la cantidad de cloro original.

Un segundo tipo de reacción que se produce al agregar cloro al agua cuando éste contiene impurezas son (Caceres, 1990):

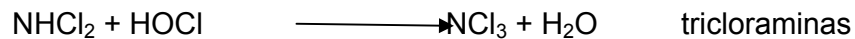
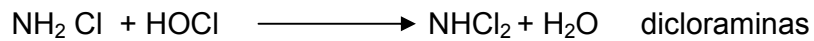
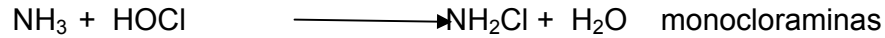
- a) Reacciones con el nitrógeno amoniacal para producir cloraminas. Las cuales se les denomina cloro residual combinado.
- b) Con los aminoácidos, compuestos orgánicos e inorgánicos, (Fe , Mn , NO_2 , H_2S) con los cuales produce distintos compuestos que forman el cloro combinado no utilizable.

a) Reacciones con el nitrógeno amoniacal

Las cloraminas (monocloramina, dicloramina, y tricloramina). Todo este grupo posee un elevado tiempo de vida, así como de toxicidad, por tanto, provee el agua de una mayor protección residual. De hecho es común que se añada amoníaco a menudo para purificar el agua potable, con el fin de convertir el cloro residual a forma combinada. Las cloraminas son utilizadas a veces, en

lugar de cloro, ozono o dióxido de cloro, ya que tienen también actividad desinfectante, aunque más lenta. Tienen la ventaja sobre el cloro de producir poco (aunque nulo) cantidades de Trihalometanos y ácidos haloacéticos. (Jiménez, 2001).

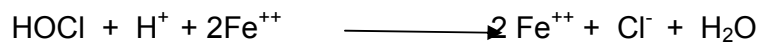
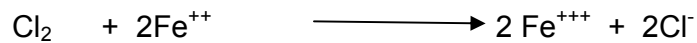
Las reacciones son:



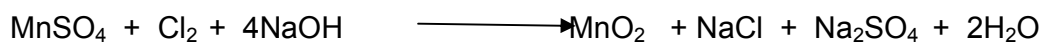
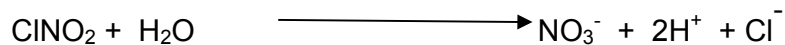
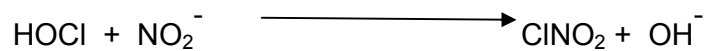
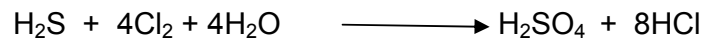
b) Reacciones con compuestos inorgánicos

Estas reacciones son, en general rápidas, puesto que se manifiesta gran tendencia a perder sus electrones y formar el ión cloruro o compuestos organoclorados (Jiménez, 2001).

El cloro y el ácido hipocloroso (o hipoclorito) reaccionan no solamente con la materia orgánica, sino también con varios aniones inorgánicos, produciéndose a su vez, bioproductos inorgánicos.



Ambas reacciones ocurren casi de inmediato a pH cercano o mayor que 7.



En todas estas reacciones, el cloro ha formado compuestos de valencia negativa, que no tienen poder desinfectante ni capacidad de combinarse con indicadores de cloro, por lo tanto no se manifiestan como cloro residual a través de los procedimientos de determinación de la misma. Esta cantidad de cloro que aparenta haberse consumido, es lo que se conoce como demanda de cloro.

2.3.2 Demanda de cloro

Para lograr la desinfección, se dosifica a niveles conocidos de cloro activo, en cualquiera de sus diferentes formas (hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, cloro gas), los cuales decrecen luego de un periodo de contacto. Cabe mencionar que para producir el efecto desinfectante, el cloro dosificado sólo debe ser consumido parcialmente. Es decir, luego del período de contacto debe mantenerse un nivel adecuado de cloro residual. A esta variación, entre el nivel de cloro añadido luego de la dosificación y el nivel de cloro residual, se le denomina “demanda de cloro” (EPA, 1999; Fonseca, 2004).

La demanda de cloro que ejerce un agua se determina experimentalmente por el método de punto de quiebre (Metcalf y Eddy, 2003), el cual se muestra en la Figura 2.1.

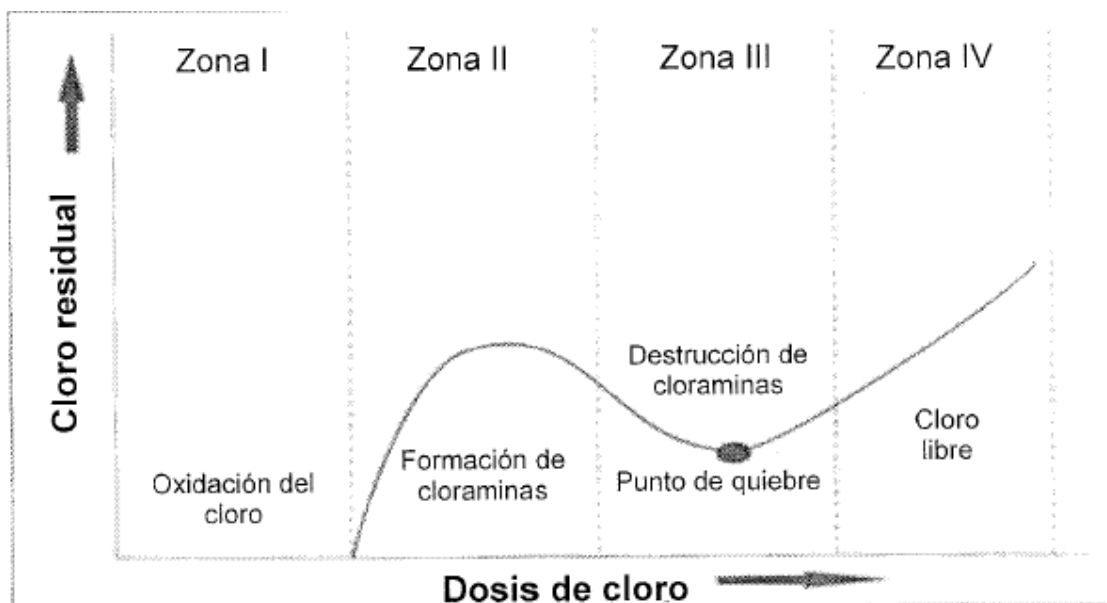


Figura 2.1. Reacciones del cloro en el agua

La Figura 2.1 se observa al evolución de las diferentes formas del cloro cuando es añadido al agua; primeramente se observa que al ir añadiendo cloro, las sustancias que reaccionan con facilidad, como el Fe^{2+} , Mn^{2+} , H_2S o la materia orgánica, reaccionan con el cloro y lo reducen en gran parte a ión cloruro (zona I, fig. 2.1). Tras satisfacer esta demanda inmediata, el cloro continuará reaccionando con el amoniaco para formar cloraminas, proceso que corresponde a la zona II. Para relaciones molares entre cloro y amoniaco inferiores a 1, se formará monocloramina y dicloramina. La distribución de estas dos formas viene dictada por sus velocidades de formación, que son función de la temperatura y del pH. En la zona II y la zona III, algunas de las cloraminas se transformaran en tricloruro de nitrógeno mientras que las restantes cloraminas se oxidarán a óxido de nitrógeno y nitrógeno y, el cloro se reducirá a ión cloruro. Si se continúa añadiendo cloro, todas las cloraminas se oxidarán en la zona III (punto de quiebre). La adición de cloro más allá del punto de quiebre (zona IV) producirá un aumento del cloro libre disponible directamente proporcional al cloro añadido (Metcalf y Eddy, 2003).

La NOM-127-SSA1-1994 establece un rango permisible de cloro residual libre de 0.2 – 1.5 mg/L, mismo que debe mantenerse a lo largo de todo el sistema de distribución para obtener una adecuada desinfección. Por otro lado, en la Tabla 2.2 se muestran dosis típicas de hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio y cloro gas en plantas de tratamiento de aguas (EPA, 1999).

Tabla 2.2

Compuesto de cloro	Rango de dosis (mg/L)
Hipoclorito de calcio	0.5 – 5
Hipoclorito de sodio	0.2 - 2
Cloro gas	1 - 16

2.4 Modo de acción

El cloro actúa causando dos tipos de daño en las células. Por un lado, afecta la integridad de la membrana y ocluye su permeabilidad, y por otro, altera funciones celulares (daña enzimas y ácidos nucleicos). Por ello, la reacción de los microorganismos ante el cloro está determinada por la resistencia de sus membranas así como por la relativa afinidad química de este compuesto con las sustancias vitales del organismo (Jiménez *et al.*, 2000).

Factor Ct

Uno de los factores más importantes para determinar o predecir la eficiencia germicida de cualquier desinfectante es el factor Ct, el cual es definido como el producto de la concentración del desinfectante, C, en mg/L, y el tiempo de contacto, t, en minutos, requerido para inactivar cierto porcentaje de la población bajo condiciones específicas de pH y temperatura. En la Tabla 2.3 se muestran valores de Ct para diferentes organismos, empleándose cloro como desinfectante.

Tabla 2.3 Valores Ct para diferentes organismos empleando cloro como desinfectante.

Microorganismos	Cloro (mg/L)	Tiempo de inactivación (minutos)	Ct
<i>Escherichia coli</i>	0.1	0.4	0.04
Poliovirus	1.0	1.7	1.7
<i>Giardia lamblia</i>	1.0	50	50
<i>Giardia muris</i>	2.5	100	250

Fuente: Jiménez *et. al.*, 2000

2.5 Ventajas y desventajas

El cloro es un desinfectante que tiene ciertas limitantes en términos de salubridad y seguridad, pero al mismo tiempo tiene un largo historial como un desinfectante efectivo. Antes de decidir si el cloro reúne las condiciones para su uso es necesario entender las ventajas y desventajas que su aplicación conlleva.

Entre las ventajas podemos citar las siguientes:

- Tecnología bien establecida.

- Es más eficiente en términos de costo que otras técnicas de desinfección; por ejemplo la radiación UV o la desinfección con ozono.
- El cloro residual permite que permanece en el efluente puede prolongar el efecto de desinfección aún después del tratamiento inicial, y puede ser medido para evaluar su efectividad.
- La desinfección con cloro es confiable y efectiva para un amplio espectro de organismos patógenos.
- Es efectivo en la oxidación de ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos.
- Permite un control flexible de la dosificación.
- Controla olores y sabores.

En cuanto a las desventajas se encuentran:

- El cloro residual, aún en bajas concentraciones, es tóxico a los organismos acuáticos y por ello puede requerirse la decloración.
- Todas las formas de cloro son muy corrosivas y tóxicas. Como consecuencia, el almacenamiento, el transporte y el manejo presentan riesgos cuya prevención requiere normas más exigentes de seguridad industrial.
- El cloro oxida ciertos tipos de materiales orgánicos del agua residual generando compuestos más peligrosos (tales como los trihalometanos).
- El cloro residual es inestable en presencia de altas concentraciones de materiales con demanda de cloro, por lo cual pueden requerirse mayores dosis para lograr una desinfección adecuada.
- Algunas especies parásitas han mostrado resistencia a dosis bajas de cloro, incluyendo a los oocistos de *Cryptosporidium parvum*, los quistes de *Entamoeba histolytica* y *Giardia lamblia*, y los huevos de parásitos intestinales (helminetos) (White, 1992; WERF, 1995; EPA, 1999).

2.5.1 Costo

El costo de los sistemas de desinfección con cloro dependen del fabricante de los equipos, la ubicación y la capacidad de la planta, así como de las características del agua a tratar y el desinfectante empleado, es decir, los

compuestos de hipoclorito, por ejemplo, tienden a ser más costosos que el cloro gas.

2.6 Subproductos de la cloración

En los años 70's, científicos determinaron que cuando se añade cloro al agua que contiene materia orgánica natural, tal como los ácidos húmicos y fúlvicos, se formaban subproductos de la desinfección, como trihalometanos (THM), halógenos orgánicos totales (TOX) y ácidos haloacéticos (AHA), siendo los primeros los que se encuentran con mayor frecuencia y cantidad (Cantor, 1994).

2.6.1 Trihalometanos

2.6.1.1. *Historia*

En 1970, el descubrimiento de cloroformo en la sangre de muchos residentes de Nueva Orleans, provocó la búsqueda de su origen, el cual fue pronto identificado como el agua potable. Este descubrimiento fue una de las razones que incitó a que se promulgara el Acta del Agua Potable segura de 1974, la cual, entre otras cosas, limitó el total de THM a 100 partes por billón (ppb) (Pedersen, 2004), siendo actualmente de 80 ppb (EPA, 1998).

Por lo anterior, en estos últimos tiempos han surgido nuevas controversias con respecto a la cloración del agua potable y la formación de THM, tanto de investigadores como de profesionales debido a los efectos dañinos de estas sustancias sobre la salud humana (Ivancev *et al.*, 1999).

2.6.1.2. Definición

Los THM constituyen un grupo de compuestos orgánicos que, como su nombre lo indica, se consideran por su nomenclatura como derivados del metano (CH_4), en cuya molécula, tres átomos de hidrógeno han sido sustituidos por igual número de halógenos (cloro, flúor, bromo o yodo o una combinación de éstos). Estos incluyen el cloroformo (CHCl_3), bromodiclorometano (CHBrCl_2), dibromoclorometano (CHBr_2Cl) y bromoformo (CHBr_3). La distribución de THM

entre estas cuatro especies depende de la concentración de bromuro en el agua (Singer, 1998; Caceres, 1990).

2.6.1.2.3. Formación de Trihalometanos

Los denominados THMs protagonizan una situación paradójica puesto que se trata de contaminantes que son fruto involuntario de un proceso, el de la cloración, que justamente sirve para desinfectar los caudales antes de ser consumidos por la población.

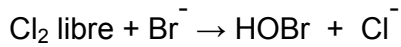
Numerosos investigadores han reportado que la materia orgánica natural (MON) es el principal precursor de THM (Singer, 1989; EPA, 1999). La MON se puede dividir en fracción hidrofóbica (material húmico) y fracción hidrofílica (material no húmico, Owen *et al.*, 1995), aunque Kim y Yu (2005) encontraron que los THM son mayormente influenciados por la fracción hidrofóbica. Por lo anterior se han propuesto parámetros que midan el contenido de materia orgánica entre los que destacan (EPA, 1999):

- Carbón orgánico total y disuelto (COT y COD);
- Absorbancia ultravioleta a una longitud de onda de 254 nm (UVA₂₅₄);
- Potencial de formación de THM (PFTHM), prueba que mide la cantidad de THM formados con una dosis de cloro libre elevada y largo tiempo de reacción.

Los precursores o MON aparecen en el agua cruda, por la descomposición de la materia vegetal que crece en las orillas de los ríos o lagos, siendo por lo tanto más abundantes en las cuencas que poseen mayor cantidad de vegetación en sus márgenes.



En presencia de bromuro, el cloro libre rápidamente oxida el ión bromuro a ácido hipobromoso (HOBr) el cual puede reaccionar con la MON para producir bromoformo.



Las reacciones antes señaladas son influenciadas por algunas variables entre las que se pueden mencionar (Cooper *et al.*, 1985; Singer, 1989; Caceres, 1990):

- a) *Temperatura*: Cuanto mayor es la temperatura del agua, se incrementan las posibilidades de la formación de trihalometanos.
- b) *Efecto del pH*: La formación de trihalometanos es mayor, conforme aumenta el valor de pH del agua, por su acción catalítica sobre el haloformo.
- c) *Residual de cloro*. La concentración de trihalometanos aumenta en razón directa con el residual de cloro.
- d) *Precursores*: Cuando en el agua sin tratar, existe gran cantidad de materia orgánica, mayor será la posibilidad de formación de trihalometanos.
- e) *Concentración del ión bromuro*: Cuando el bromuro está presente favorece la formación de THM bromados.
- f) *Tipo de desinfectante*: Conforme a su tipo, el desinfectante ejerce una influencia decisiva en la formación de los trihalometanos.

2.6.1.4. Control de THM

Algunas de las metodologías para limitar la concentración de THM en agua potable incluyen las siguientes (Singer, 1989):

- Aeración
- Optimización de la coagulación para la remoción de precursores (COT)
- Remoción de precursores por medio de adsorción con carbón activado o membranas de filtración
- Cambiar los puntos de aplicación de cloro
- Usar cloro combinado (NH_2Cl) como desinfectante secundario
- Usar desinfectantes alternativos (ozono, dióxido de cloro, UV, etc.)

Finalmente, conviene señalar que los trihalometanos no se forman exclusivamente durante la fase del tratamiento del agua. Por ser dependiente de la concentración de los precursores y de la dosis de cloro residual, la reacción que da origen a los THMs, puede continuar desarrollándose en el sistema de distribución.

III. METODOLOGÍA

3.1 Ubicación y descripción del sitio

El agua a emplear en el presente estudio proviene de la cuenca hidrológica del valle de México que es una cuenca cerrada que se localiza en el centro de la República Mexicana entre los paralelos 19°03'36" y 20°11'24" de latitud norte entre los meridianos 98°12'00" y 99°31'12" de longitud oeste. Limita al norte con la sierra de Pachuca y Mesa grande, al este con las sierras de Calpulalpan y de Río Frío, al sur con las sierras Nevada, del Chichinautzin y la del Ajusco, y al oeste con la sierra de las Cruces y de Monte Bajo, con un área drenada de 16 000 km² que incluye al Distrito Federal, 56 Municipios del Estado de México, 39 de Hidalgo y 4 de Tlaxcala, (Balance Hídrico del Valle de México; IMTA 2003).

En este mismo contexto se empleo el agua potable que llega a los consumidores, a través de la red de distribución, de cinco delegaciones del Distrito Federal: Benito Juárez, Milpa Alta, Tlalpan, Tláhuac y Xochimilco; así como de Tlalnepantla Estado de México.

3.2 Preparación del material

Todo el material utilizado para la medición de los parámetros fisicoquímicos así como para el transporte de las muestras se lavó con agua y un detergente libre de fosfatos (Extran) y se enjuagó con agua destilada.

El material utilizado para la determinación de Trihalometanos, se lavó con agua y Extran, por último se enjuagó con agua destilada

Para las determinaciones microbiológicas, el material empleado se lavó, secó y se cubrió con papel aluminio, posteriormente fue sometido a esterilización en autoclave durante 15 minutos a 121°C o 15 psi. Así mismo, se utilizaron bolsas estériles (Nasco whirl-pak/100ml)

En la realización de las mediciones de cloro libre se emplearon recipientes de plástico para la determinación *in situ*.

3.3 Muestreo

Los muestreos se realizaron durante los meses de Enero a Julio del 2009, obteniéndose muestras para la determinación de parámetros fisicoquímicos, THM'S, bacteriológicos y cloro libre. Los lineamientos para la toma de muestra se realizaron de acuerdo a la NOM-014-SSA1-1993.



Figura 3.1. Toma de muestra

Cuando no era posible tomar la muestra en forma directa, se ata una cubeta a un cordón limpio para sacar el agua (fig. 3.2).



Figura 3.2.
Muestreo
realizado en
tanque.

Las muestras para el análisis de Trihalometanos se recolectaron en tubos de vidrio de 50 ml y se llenaron completamente a volumen cero (fig. 3.3).



Figura 3.3. Recipiente para la recolección de muestra para el análisis de Trihalometanos.

Para los análisis microbiológicos se tomaron las muestras en bolsas estériles (Nasco whirl-pak/100ml), se mantuvieron a 4°C para su posterior análisis durante no más de 24 horas después de haber sido recolectadas. De igual forma, se realiza este procedimiento en la toma domiciliaria.



Figura 3.4. Bolsas estériles empleadas para la determinación de Coliformes Totales y Coliformes Fecales

Las muestras para la determinación de cloro libre se tomaron en recipientes de plástico de 50 ml para su inmediato análisis *in situ*, utilizando solo 10 ml (fig. 3.5) que es lo que describe la técnica.



Figura 3.5. Volumen de muestra para la determinación de Cloro libre.

Tanto las muestras tomadas para pruebas bacteriológicas como para fisicoquímicas fueron colocadas en hieleras con bolsas refrigerantes de hielo para su transporte al laboratorio, (fig. 3.6) a una temperatura entre los 4 y 10 °C. Para los análisis físico-químicos, se respetó el periodo de preservación establecido para cada parámetro de acuerdo a la NOM-230-SSA1-2002, la cual ofrece criterios para manejo, preservación y transporte de muestras.



Figura 3.6. Muestras listas para ser transportadas.

3.4 Técnicas analíticas empleadas

Todos los análisis se realizaron en laboratorio de Bioprocesos e Ingeniería ambiental del Instituto de Ingeniería, siguiendo las técnicas normalizadas de la 20th edición del *Standard Methods (APHA, AWWA, WEF, 1998)*, así como de las Normas Mexicanas vigentes.

3.5 Caracterización del agua

En la caracterización del agua obtenida de los muestreos, se dividieron en dos grupos, los que se midieron en campo (Tabla 3.1): *temperatura, pH, turbiedad, conductividad, sólidos disueltos totales (SDT), y Cloro libre*; por otro lado, el segundo grupo de análisis se realizaron en el laboratorio: *Absorvancia UV a 254 nm, SDT, Sólidos Suspendidos Totales (SST), alcalinidad, dureza, cloruros, nitratos, nitritos, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, carbono orgánico total, demanda química de oxígeno, fosfatos, sulfatos, Trihalometanos, coliformes totales y coliformes fecales*. La Tabla 3.2 resume los parámetros seleccionados para el desarrollo del trabajo experimental, debido a la relación que tienen para evaluar la desinfección así como la formación potencial de subproductos.

Tabla 3.1. Parámetros medidos en campo.

Parámetro	Equipo/Técnica/Referencia
Temperatura	Potenciómetro HACH (NMX-AA-007-SCFI-2000)
pH	Potenciómetro HACH (NMX-AA-008-SCFI-2000)
Turbiedad	Turbidímetro (NMX-AA-038-SCFI-2001) HANNA
Conductividad	Potenciómetro HACH (NMX-AA-093-SCFI-2000)
Sólidos disueltos totales	Potenciómetro HACH (NMX-AA-034-SCFI-2001)
Cloro libre *	Clorímetro HACH (NMX-AA-108-SCFI-2001)

* Parámetro de interés para el trabajo experimental

Tabla 3.2. Parámetros medidos en el laboratorio de interés para este trabajo.

Parámetro	Equipo/Técnica/Referencia
-----------	---------------------------

Absorbancia UV a 254 nm	Espectrofotómetro Perkin-Elmer Lambda 3B UV/VIS	
Carbono orgánico total	Espectrofotómetro-DR500	EPA 8260B
Coliformes Fecales	Filtración por membrana	APHA, AWWA, WEF (1998)
Coliformes Totales	Filtración por membrana	APHA, AWWA, WEF (1998)
Nitrógeno amoniacal	Espectrofotómetro	Método Nessler*
Trihalometanos	Espectrofotómetro-DR500	EPA 8260B NOM-127-SSA1-1994

*Pruebas realizadas de acuerdo al manual del espectrofotómetro

Así mismo, parte del equipo empleado para la determinación de algunos parámetros se muestran a continuación:



Figura 3.7 Espectrofotómetro Perkin-Elmer Lambda 3B UV/VIS empleado para medir Absorbancia UV a 254 nm.



Figura 3.8. Espectrofotómetro HACH DR500 empleado para la determinación espectrofotométrica de carbono orgánico total, nitratos, nitritos, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, fosfatos y Trihalometanos.



Figura 3.9. Turbidímetro HANNA empleado para la determinación de turbiedad en agua potable.



Figura 3.10. Potenciómetro HACH utilizado para los análisis en campo.



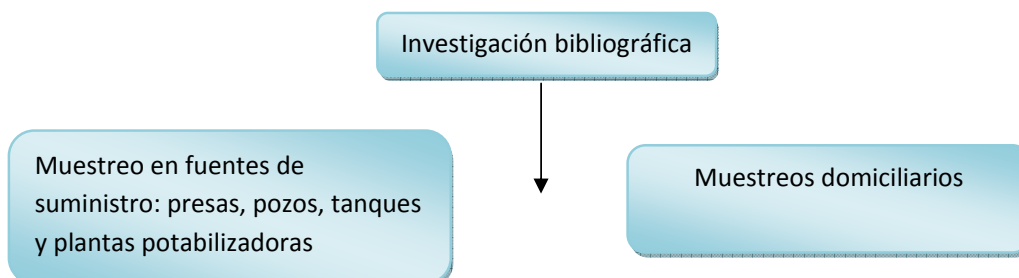
Figura 3.11. Colorímetro HACH empleado para la medición de cloro libre *in situ*.

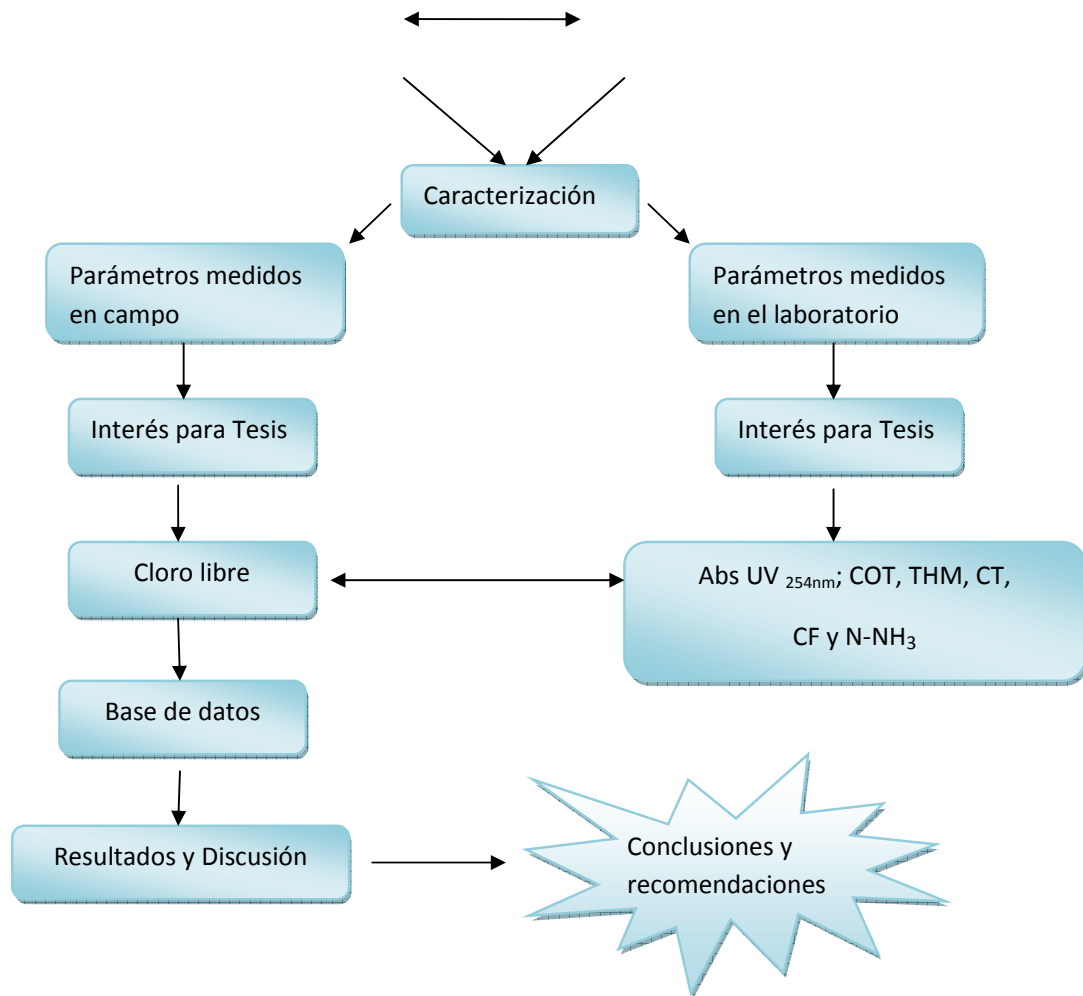
3.6 Base de datos

Los resultados obtenidos en todo el estudio, se organizaron por medio del programa Excel, en donde se organizaron cada uno de los parámetros de interés para después ser discutidos; los detalles de la base de datos se presentan en el anexo A.

3.7 Resumen de trabajo

A continuación se muestra el diagrama de flujo de todo el experimento realizado en el presente trabajo.





IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para un buen manejo de los resultados obtenidos, éstos se dividieron en cinco grupos:

- a) Presas,
- b) Pozos,
- c) Tanques,
- d) Plantas potabilizadoras y
- e) Domiciliarios.

4.1. Resultados en Presas

Dado que las presas estas consideradas como fuentes de abastecimiento, no se utiliza el agua directamente para consumo humano; para ello, se aplica una potabilización posterior, luego entonces, es necesario conocer la calidad de estas fuentes de suministro en cuanto a los parámetros de interés.

4.1.1. Cloro Residual libre

Al tratarse de presas de almacenamiento no se tiene información de una precloración realizada antes de utilizar esta agua para una potabilización posterior. Esto se muestra en la Figura 4.1, en donde se observa que en todas las presas muestreadas se tiene una concentración de cloro residual libre por debajo de lo establecido por la NOM-127 –SSA1-1994, que reporta un límite permisible de por lo menos 0.2mg/L de cloro residual como mínimo.

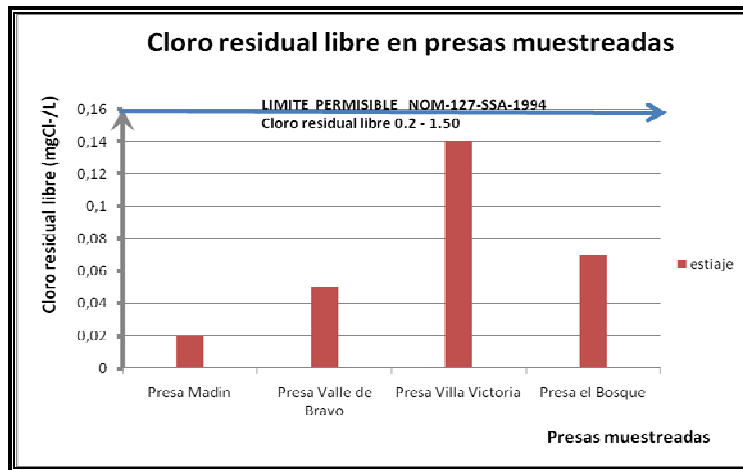


Figura 4.1. Cloro residual libre en las diferentes presas muestreadas.

Como dato representativo, al observar la concentración de 0.14mg/L de cloro residual en la presa Villa Victoria, dato, que esta lejos del limite permisible, tenemos que esta concentración no es suficiente para lograr una desinfeccion que asegure su uso directo por la poblacion vecina sin consecuencias a la salud.

4.1.2. Carbono Orgánico Total (COT)

La materia orgánica natural, medida como Carbono Orgánico total (COT), esta presente en las diferentes presas muestreadas, como se observa en la Figura 4.2 Aquí podemos ver que la concentración máxima encontrada es de 6.3 mg/L en la presa Villa Victoria, que es una presa de almacenamiento para la planta potabilizadora los berros del sistema Cutzamala, es muy alto comparado, por ejemplo, con la presa Madín que es de 1.2 mg/L; que también cuenta con una planta potabilizadora.

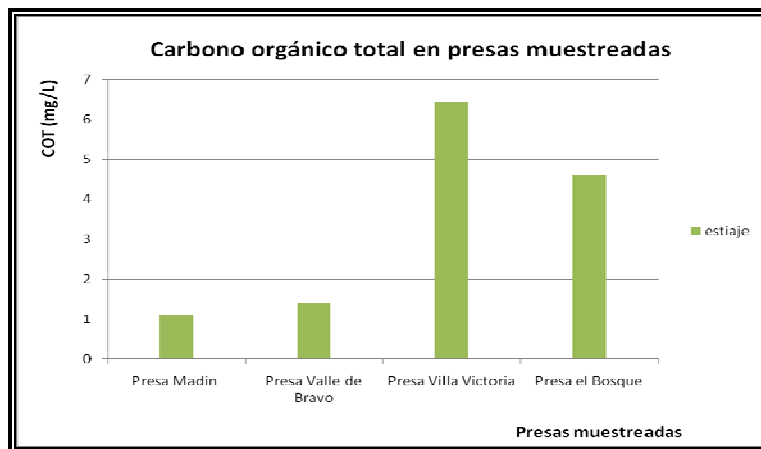


Figura 4.2. Carbono orgánico total en presas muestreadas

Como referencia para las concentraciones de COT, estas se encuentran por debajo de la concentración promedio que se encuentra en lagos sin contaminación, que es de 30 mg/L como máximo (Wetzel, 1981).

Cabe mencionar que el carbono orgánico presente en estas muestras, presumiblemente, se encuentra disuelto dado que estas presas son de almacenamiento y están a cielo abierto; es decir, tienen influencia de sedimentos, arrastre de arroyos, algas, peces, hojas de árboles y todo aquello que de alguna forma aporte materia orgánica al embalse.

4.1.3. Trihalometanos Totales (THMT)

La Norma oficial mexicana, NOM-127 SSA1-1994 establece como límite máximo permisible para Trihalometanos totales una concentración de 0.20 mg/L, cantidad que se encuentra muy por arriba de las concentraciones encontradas en las diferentes presas muestreadas, Figura 4.3.

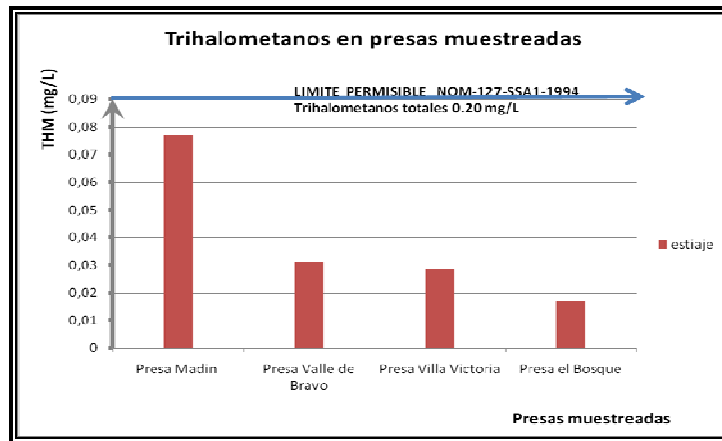


Figura 4.3. Trihalometanos totales presentes en las presas muestreadas.

La concentración máxima encontrada en estos lugares es de 0.075mg/L que es una concentración inferior a lo aceptada tanto por la Normatividad mexicana como por otras normas internacionales, tal es el caso de la EPA y UE que establecen una concentración de 0.1mg/L como máximo.

4.1.4. Coliformes Totales (CT)

En la Figura 4.4 se resume los resultados de coliformes totales obtenidos en los distintos puntos de muestreo.

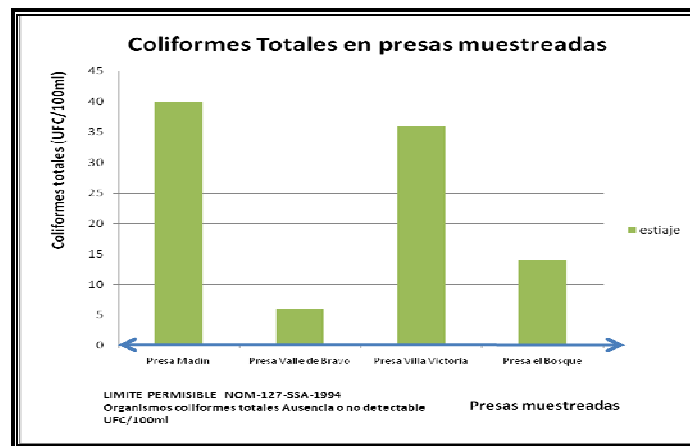


Figura 4.4. Coliformes Totales en las diferentes presas muestreadas.

La problemática que tienen las presas muestreadas son un alta concentración de coliformes totales, por ejemplo, la mayor concentración encontrada es de 40 UFC/100ml que es un valor muy alto con respecto a lo reportado por la NOM-127-SSA1-1994 que establece 2 UFC/100ml como máximo.

Estos resultados son acordes por lo obtenido en la Figura 4.1 que nos muestra la concentración de cloro residual libre en estas mismas presas. Para entenderlo mejor, a una concentración baja y/o nula de cloro libre, habrá presencia de organismos coliformes totales.

4.1.5. Coliformes Fecales (CF)

Los organismos coliformes fecales son un indicativo de la contaminación fecal de la fuente de suministro, la Figura 4.5 resume los resultados obtenidos para este análisis.

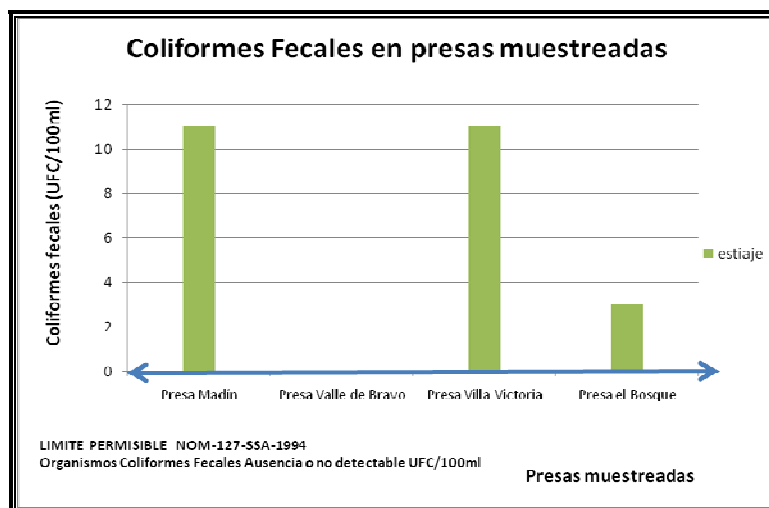


Figura 4.5. Coliformes Fecales en las diferentes presas muestreadas.

Como se puede observar, las presas Madín, Villa Victoria y el Bosque presentan concentraciones de coliformes fecales por encima del límite establecido por la NOM-127-SSA1-1994 que es de ausencia de coliformes fecales medidos como UFC/100ml.

No obstante, la presa valle de bravo presenta un valor de cero o ausencia UFC/100 ml de coliformes fecales.

Estos resultados están relacionados con la Figura 4.1, donde se observa las bajas concentraciones de cloro libre, mismas que permiten la convivencia de estos microorganismos en las presas.

Al comparar la concentración de cloro residual (fig. 4.1) con la ausencia de coliformes fecales en la presa Valle de bravo, se tiene que, ¿a pesar de existir un poco cantidad de cloro libre es suficiente para reducir la concentracion de coliformes fecales hasta un nivel permisible por la normatividad vigente? No.

No, Por que este mismo comportamiento es el que deberian de seguir las demas presas, sin embargo no es así. Esto lo podemos atribuir por diferentes causas, una de ellas es que alguna sustancia hubiese provocado la inhibición en el desarrollo de estos organismos o bien, la determinacion en el laboratorio no fue la correcta. Por lo que se desecha la posibilidad de que una concentración de 0.045mg/L de cloro libre es suficiente para dar como resultado una ausencia de este tipo de micrroorganismos en esta presa.

4.1.6. Nitrógeno amoniacal

Los resultados de las determinaciones de nitrógeno amoniacal se presentan en la Figura 4.6.

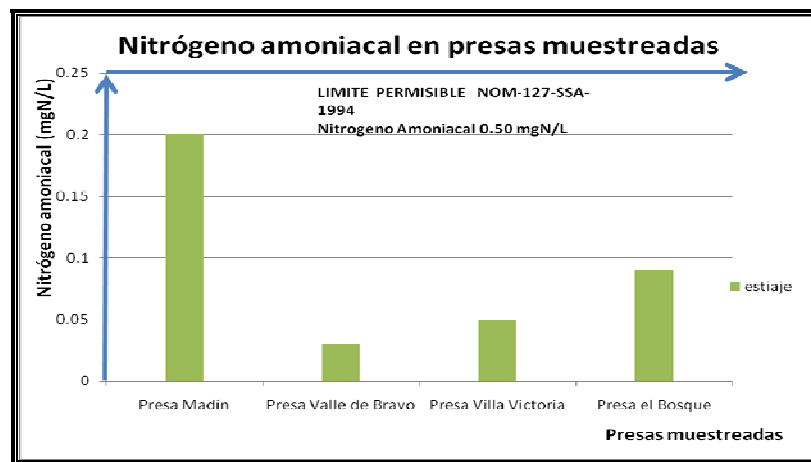


Figura 4.6. Nitrógeno amoniacal en presas muestreadas.

Como se puede apreciar, todos los puntos muestran concentraciones de nitrógeno amoniacal por debajo de lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994 que es de 0.5 mgN/L. Esto se debe que el amoníaco , como ion amonio, es el contaminante que se encuentra con mayor frecuencia en el agua, ya que es un producto natural presente en aguas superficiales. El NH_4^+ se produce por desaminación de compuestos orgánicos nitrogenados y por hidrólisis de la urea (Jiménez, 2001).

4.2. Resultados en Pozos

Estas fuentes de suministro, consideradas como subterráneas, también mostraron índices de contaminación en los parámetros de interés.

4.2.1. Cloro residual libre

La Figura 4.7 resume el comportamiento para este parámetro en los distintos pozos muestreados.

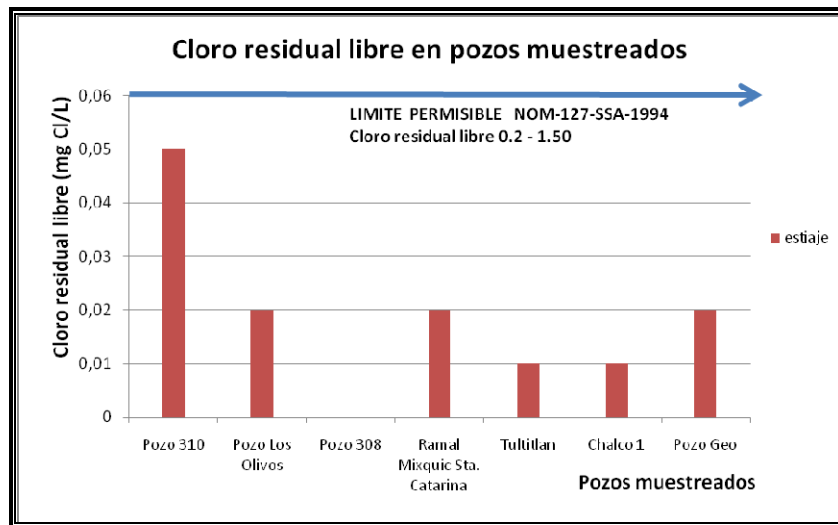


Figura 4.7. Cloro residual libre presente en los sitios muestreados.

Las concentraciones muy inferiores por debajo del 0.2mg/l, refieren que por ser una fuente de suministro subterránea, este parámetro es de importancia como antecedente de calidad inicial en estos pozos.

4.2.2 Carbono Orgánico Total (COT)

Al realizar en análisis de la materia orgánica en estas fuentes de suministro, se encontraron los siguientes resultados, Figura 4.8.

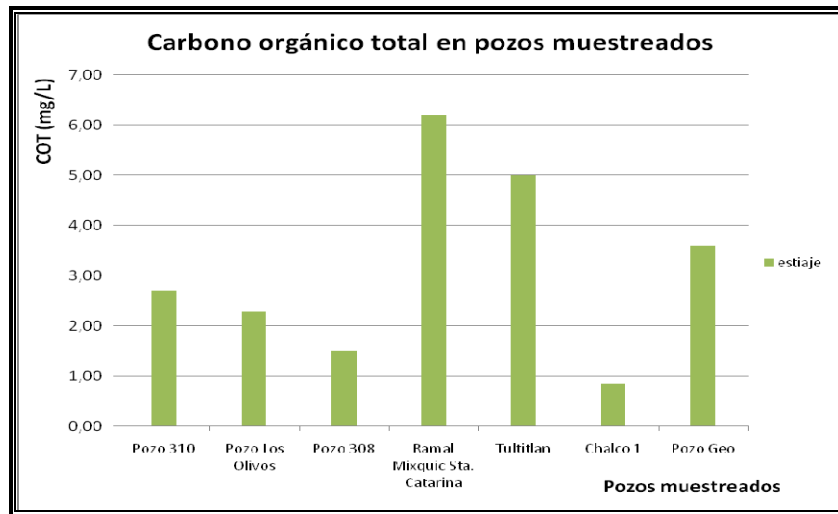


Figura 4.8. Carbono orgánico total en sitios muestreados

Como se puede observar, todos los pozos muestreados presentan como mínimo una concentración de 1 mg/L de carbono orgánico total, siendo la batería de pozos Mixquic- Sta. Catarina, la que tiene la concentración máxima de COT con 6 mg/L. Estos resultados nos dan una idea de los productos a formarse una vez que se lleve a cabo la desinfección con cloro; es decir, se pueden formar subproductos de la desinfección como los Trihalometanos.

4.2.3. Trihalometanos Totales (THMT)

En la Figura 4.9 podemos observar los resultados para los Trihalometanos totales encontrados en los diferentes pozos muestreados.

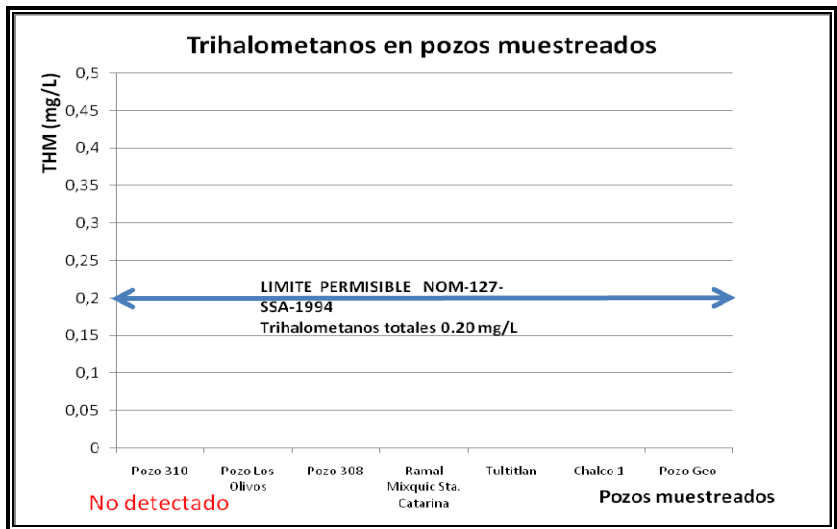


Figura 4.9. Trihalometanos presentes en pozos muestreados.

La Figura 4.9 nos revela que no hay presencia de Trihalometanos totales debido a que no hay una contaminación inicial de estos compuestos en estas fuentes de suministro. Sin embargo, con lo encontrado en la figura 4.8, se puede tener un potencial de formación de Trihalometanos (PFTHM) en el proceso de desinfección al reaccionar con el cloro residual libre.

4.2.4. Coliformes Totales (CT)

Los organismos coliformes totales determinados en estos sitios de muestreo, se resumen en la Figura 4.10.

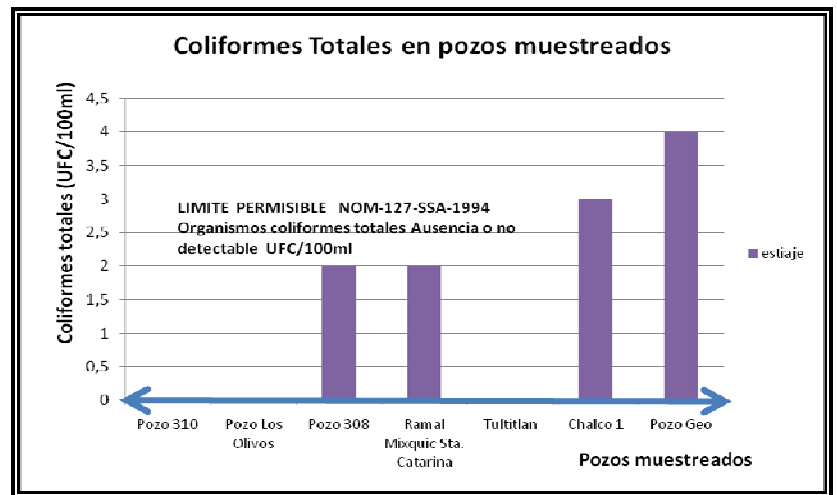


Figura 4.10. Coliformes totales en los diferentes pozos muestreados

De igual forma que en la Figura 4.7, esta determinación de coliformes totales, se establece como un parámetro de contaminación microbiológica inicial. Puesto que las bacterias pertenecientes al grupo de los coliformes totales (excluida *E. coli*) están presentes tanto en aguas residuales como en aguas naturales. Algunas de estas bacterias se excretan en las heces de personas y animales, pero muchos coliformes son heterótrofos y capaces de multiplicarse en suelos y medios acuáticos (Grabow, 1996).

4.2.5. Coliformes Fecales (CF)

Este grupo de microorganismos generalmente nos indica contaminación del tipo fecal; los resultados obtenidos para los pozos muestreados se presentan en la Figura 4.11.

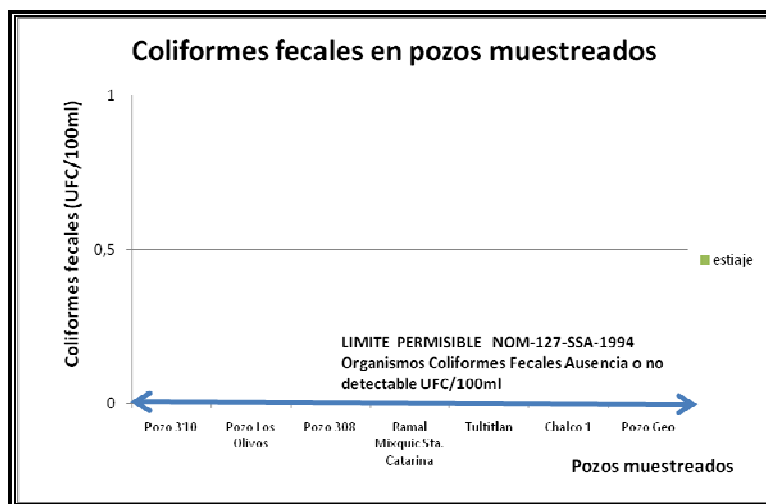


Figura 4.11. Coliformes Fecales en pozos muestreados

Como ya se había mencionado, este grupo de microorganismos nos dan una idea de la contaminación microbiológica inicial, por ello, estos microorganismos son considerados como indicadores de contaminación de tipo fecal. En la Figura 4.11. se observa que el agua de estos pozos esta libre de coliformes fecales; es decir, se considera de buena calidad en cuanto a estar libre de contaminación por heces.

4.2.6. Nitrógeno Amoniacal

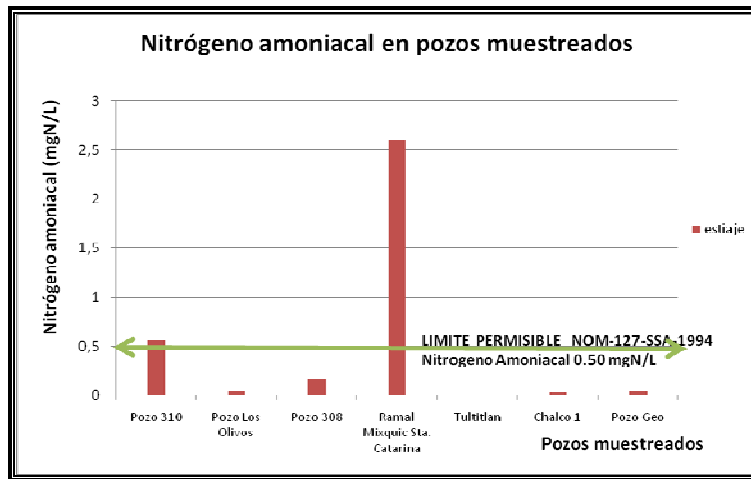


Figura 4.12. Nitrógeno Amoniacal en los diferentes pozos muestreados.

La Figura 4.12, nos presenta la concentración de nitrógeno amoniacal inicial en los pozos muestreados, como se puede observar tanto el pozo 310 como la batería de pozos del ramal Mixquic-Santa Catarina presentan concentraciones de 0.6 y 2.6 mg/L respectivamente, estos resultados están por encima de lo establecido como limite en la NOM-127-SSA1-1994 que es de 0.50 mg/L de Nitrógeno Amoniacal.

4.3. Resultados en Tanques

Es importante señalar que estos sitios muestreados no se consideran como fuentes de suministro como tal, sino que el agua de presas y pozos se almacenan en estos tanques, por lo cual se hace la aclaración de considerarse como puntos de distribución y no como fuentes de suministro.

4.3.1. Absorbancia UV a 254nm (Abs UV)

La inclusión de este parámetro en los tanques nos da información sobre la materia orgánica contenida, al igual que el COT, en estos puntos de distribución. La Figura 4.13, resume los resultados obtenidos en los sitios muestreados.



Figura 4.13. Absorvancia UV en distintos tanques muestreados.

Como podemos observar en la Figura 4.13 se presenta los resultados para la Absorvancia UV, y encontramos que existe materia orgánica en las muestras analizadas. Sin embargo, esta determinación solo es cualitativa y no cuantitativa, como por ejemplo el COT.

4.3.2. Cloro residual libre

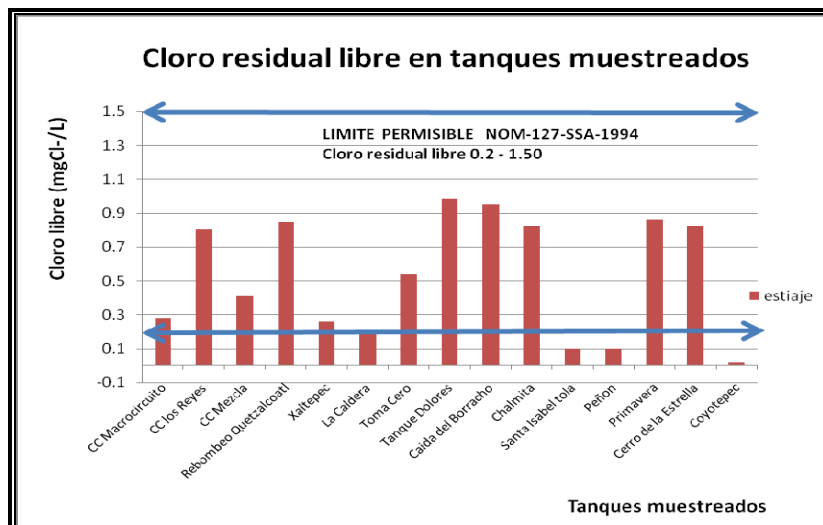


Figura.4.14. Cloro residual en tanques muestreados.

Como se observa en la Figura 4.14, la mayoría de los tanques analizados presentan un residual de cloro que se encuentra en los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 que van de 0.2 – 1.5 mg/L, sin embargo, los tanques

Santa Isabel Tola, Peñón y Coyotepec, tienen una concentración inferior al establecido en la norma mexicana.

Con un residual de cloro libre se asegura la calidad bacteriológica del agua, lo que implica que los tanques Tola, Peñón y Coyotepec presumiblemente no cumplan con esta calidad.

4.3.3. Carbono Orgánico Total (COT)

Complementariamente a la Figura 4.13, se realizó el análisis de COT para los distintos tanques muestreados, esto se resume en la Figura 4.15.

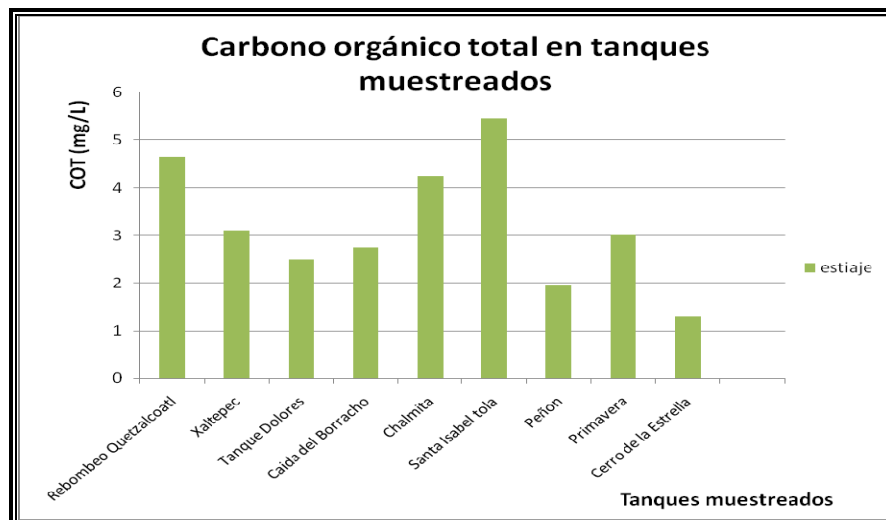


Figura 4.15. Carbono orgánico total en tanques muestreados.

Los resultados de COT se expresan en mg/L y no así la Absorbancia UV; por lo cual se observa que la Figura 4.13 es similar a lo obtenido en la Figura 4.15, que es el resultado de la materia orgánica presente en cada una de las muestras analizadas, luego entonces, se deduce que al existir materia orgánica y cloro libre, existe un potencial de formación de Trihalometanos al realizar una poscloración antes, de la distribución de esta agua.

4.3.4. Trihalometanos Totales

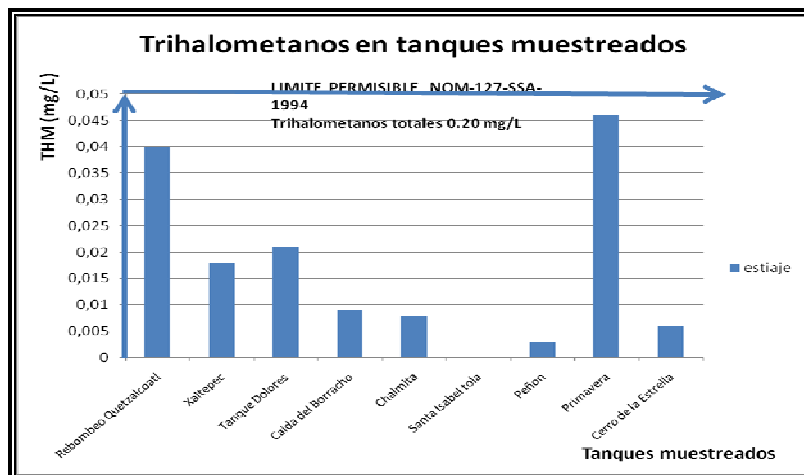


Figura 4.16. Trihalometanos totales en tanques muestreados.

Es de suma importancia considerar que la presencia de estos compuestos en tanques de almacenamiento es un riesgo potencial para la población que finalmente consume esta agua.

En la figura 4.16 se puede observar que las concentraciones de THMT están muy por debajo de lo establecido en la norma oficial mexicana que dicta un máximo de 0.20 mg/L de THMT. Ahora bien, el valor máximo encontrado se sitúa en el tanque primavera con una concentración de 0.045 mg/L que es la mitad de la máxima permitido por la EPA que establece 0.080mg/L de THMT. No obstante, la OMS establece un valor de 0.20 mg/L para THMT; es decir, no se rebasa la concentración de estos compuestos inicialmente.

Al aplicar un poscloración a esta agua, puede existir un incremento en estos resultados debido a que como ya se había mencionado en la Figura 4.15 nos muestra la materia orgánica disponible para elevar la concentración de THMT.

4.3.5 Coliformes Totales

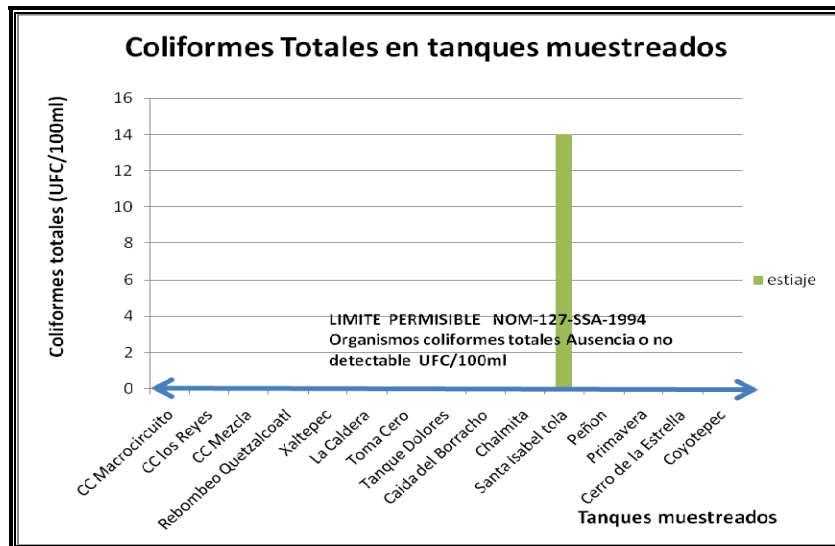


Figura 4.17. Coliformes Totales en tanques muestreados.

La Figura 4.17, resume los resultados obtenidos para la determinación de Coliformes Totales, y podemos observar que la gran mayoría de tanques muestreados presentan ausencia de estos microorganismos; sin embargo, el tanque Santa Isabel Tola tiene un valor de 14 UFC/100 ml que es un dato muy por arriba de lo establecido en la NOM-127-SSA-1994, (2 UFC/100ml). Esto se puede asociar a una baja concentración de cloro libre en este tanque, que fue de 0.1 mg/L.

Ahora bien, los tanques Peñon y Coyotepec también presenta concentraciones bajas de cloro libre, sin embargo, no presentan resultados de coliformes totales similares al tanque Peñon. Esto se puede explicar debido a una concentración inicial de estos microorganismos que fueron inactivados con el poco cloro residual presente.

4.3.6. Coliformes Fecales

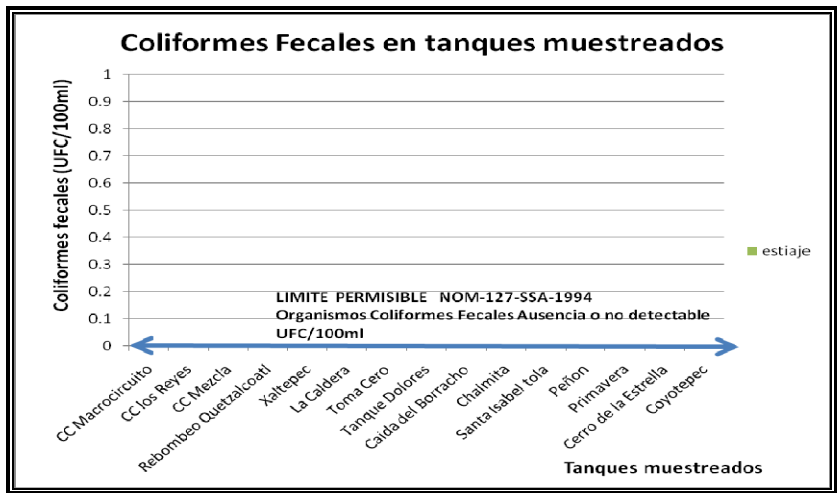


Figura 4.18. Coliformes fecales en tanques muestreados.

Como ya se había mencionado antes, la mayoría de los tanques muestreados presentan un residual de cloro suficiente para asegurar la calidad microbiológica, esto se viene a reforzar con lo presentado en la Figura 4.18, que resume la ausencia de Coliformes Fecales en todos los tanques analizados. Es por demás señalar que todos estos sitios muestreados están dentro de la NOM-127-SSA1-1994 al presentar ausencia de Coliformes Fecales.

4.3.7. Nitrógeno Amoniaca

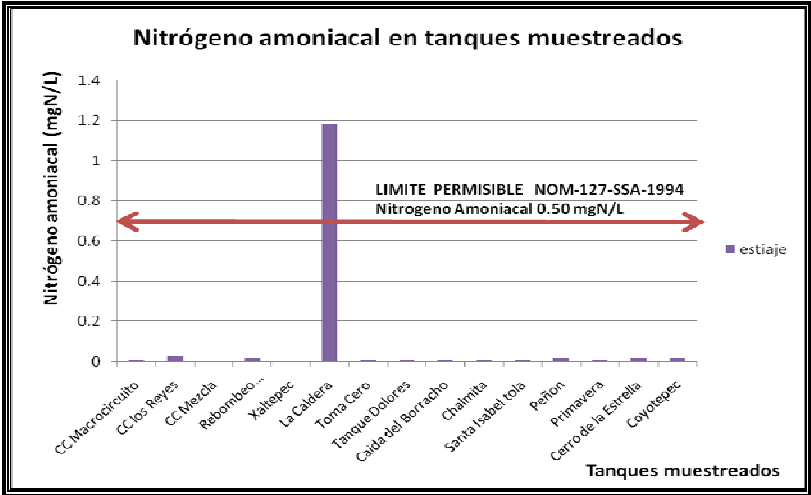


Figura 4.19. Nitrógeno Amoniaca en tanques muestreados.

La determinación de este parámetro es por la formación de nitrosaminas y su actividad desinfectante. En la figura 4.19, se observa que todos los tanques muestreados, a excepción del tanque la Caldera, se encuentran dentro del límite establecido por la NOM-127-SSA-1994.

El tanque la Caldera sobrepasa la norma, sin embargo, se cumple con la actividad desinfectante en cuanto a los organismos Coliformes totales y fecales, para este tanque; figuras 4.17 y 4.18, respectivamente.

4.4. Resultados en Plantas Potabilizadoras

4.4.1. Absorvancia UV 254 nm

De igual forma que en los resultados en tanques, se presenta en la Figura 4.20, los resultados obtenidos para este parámetro en las distintas plantas potabilizadoras.

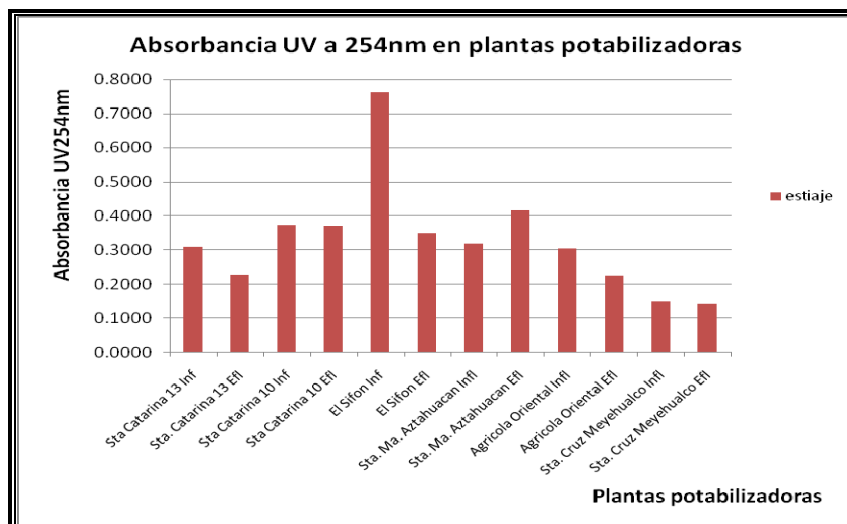


Figura 4.20 Absorvancia UV en plantas potabilizadoras.

Como se puede observar, se tiene la presencia de materia orgánica en estos sitios muestreados a niveles considerables lo cual, hace pensar que los resultados de Carbono Orgánico total se han altos.

4.4.2. Cloro residual libre

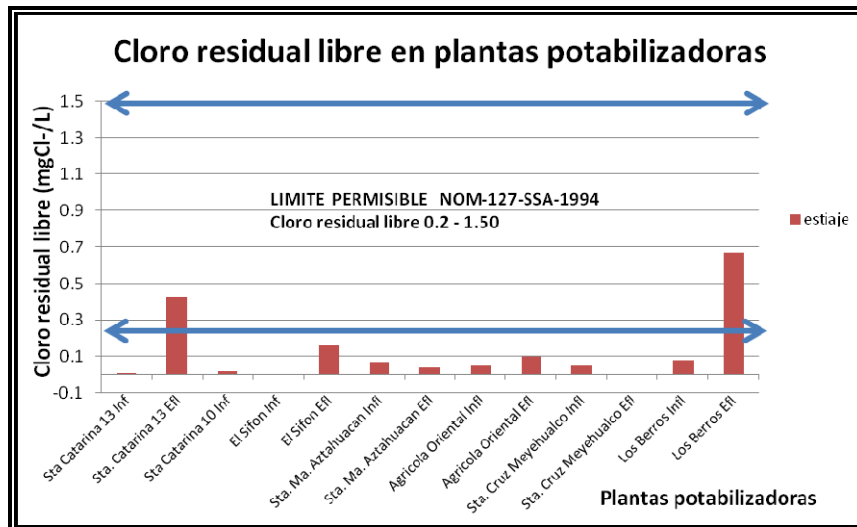


Figura4.21. Cloro residual en plantas potabilizadoras.

La NOM-127-SSA1-1994 establece un mínimo de residual de cloro de 0.2 mg/L. En la Figura 4.21, podemos observar que solo dos plantas, en sus efluentes, cumplen con esta norma. La planta los berros del sistema Cutzamala tiene un residual de cloro de casi 0.7 mg/L, esto es porque se asegura la calidad microbiológica hasta llegar a su destino en el Valle de México. Por otro lado, la planta Santa Catarina 13 maneja un residual de cloro de 0.4 mg/L, con esta calidad se va directamente a la red de distribución.

Ahora, las otras plantas potabilizadoras no cumplen con la normatividad, probablemente necesitan revisar sus equipos de cloración para lograr una dosificación eficiente.

4.4.3. Carbono Orgánico Total (COT)

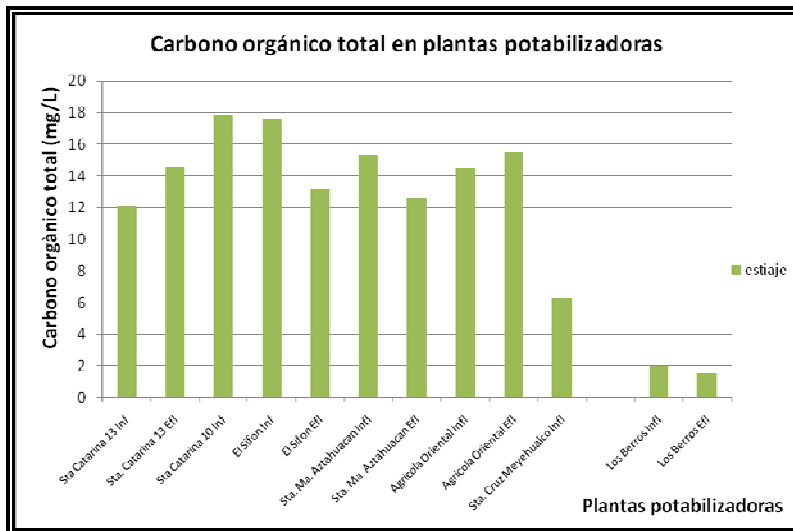


Figura 4.22. Carbono Orgánico Total en plantas potabilizadoras.

Los resultados que se presentan para este parámetro son congruentes con la Figura 4.20, y por eso se determina que la materia orgánica es una constante en la mayoría de las plantas analizadas. Ahora bien, tenemos una concentración considerable de materia orgánica que puede reaccionar con el cloro libre para formar Trihalometanos, sin embargo, se necesita observar la Figura 4.22 para aseverar esto.

4.4.4. Trihalometanos Totales (THMT)

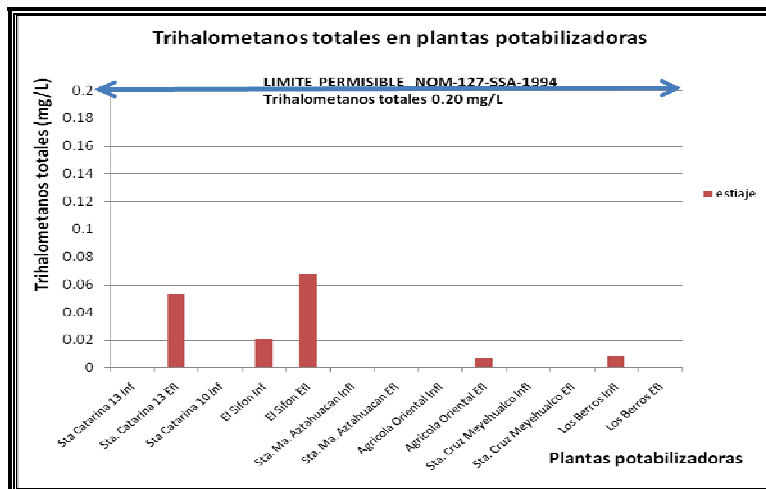


Figura 4.23. Trihalometanos Totales en plantas potabilizadoras.

La concentración de THMT no significa un riesgo potencial para la población, puesto que en la Figura 4.23, se observa que estos compuestos no están presentes en todas las plantas potabilizadoras, más aún, solo cuatro plantas

registran la presencia de THMT en concentraciones muy por debajo de lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994 que es de 0.2 mg/L.

Recordemos la concentración máxima permitida por la EPA para estos compuestos que es de 0.08 mg/L, esta concentración esta cercana a lo obtenido en el efluente de la planta potabilizadora el Sifón que es de 0.065 mg/L; es decir, se tendría que tener especial cuidado con la formación de estos compuestos, ya que se trata del efluente que se va directamente a la red de distribución.

4.4.5. Coliformes Totales

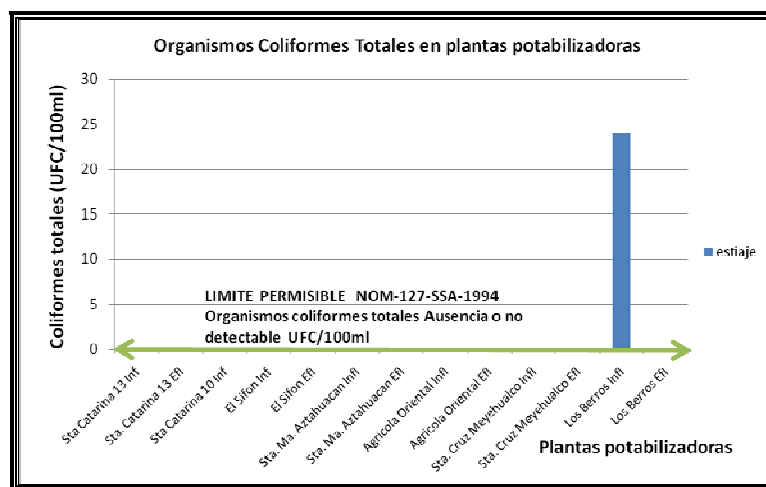


Figura 4.24. Coliformes totales en plantas potabilizadoras.

La mayoría de las plantas potabilizadoras se construyen a pie de pozo, lo que significa que la calidad inicial será determinante en el efluente de dicha planta. En este contexto, la Figura 4.24, muestra los resultados de coliformes totales en estos sitios, y se observa que casi todas las plantas están exentas de estos microorganismos. La planta potabilizadora los berros, en su influente, se tiene un resultado de 24 UFC/100ml; esto no se considera importante debido a que es el agua que se potabilizará, sería un parámetro a considerar si existe la presencia de coliformes totales en el efluente de esa planta.

4.4.6. Coliformes Fecales

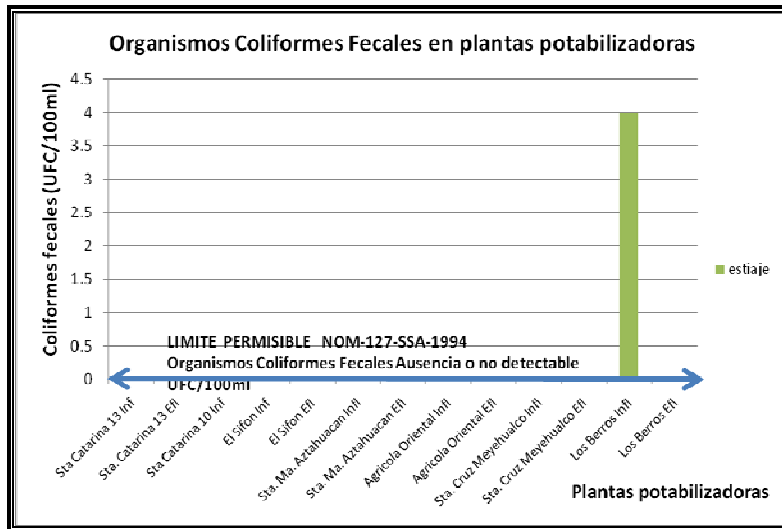


Figura 4.25. Coliformes fecales en plantas potabilizadoras.

De igual manera que en la Figura 4.24, se observa que hay presencia de microorganismos en el influente de la planta los berros y que no se considera importante. Las plantas restantes tienen como resultado una ausencia de organismos coliformes fecales tanto en su influente como en el efluente; lo anterior se muestra en la Figura 4.25.

Es importante señalar que a pesar de no tener una concentración de cloro residual acorde a la normatividad mexicana, se observa que no hay presencia de coliformes totales y fecales en la mayoría de las plantas potabilizadoras. Esto lo podemos explicar por la probable formación de cloraminas que están ejerciendo un efecto desinfectante en estos sitios.

4.4.7. Nitrógeno Amoniacal

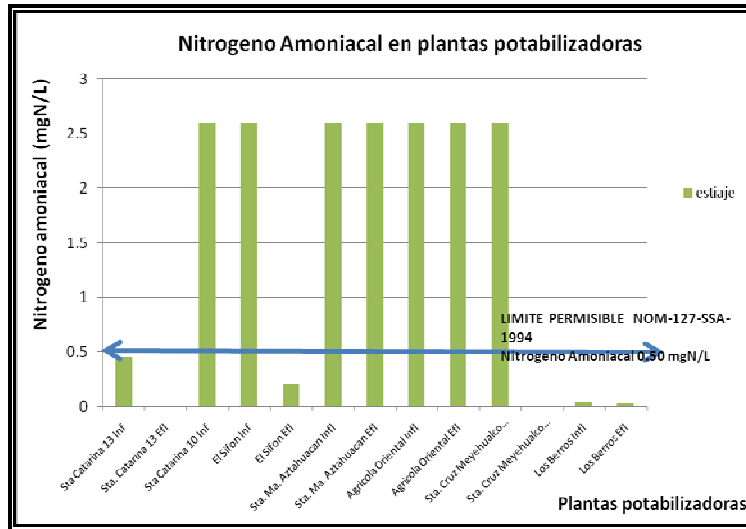


Figura 4.26. Nitrógeno amoniacal en plantas potabilizadoras.

Como se puede observar, la Figura 4.26, nos muestra que la concentración de nitrógeno amoniacal sobre pasa la norma mexicana, sin embargo, presumiblemente, este compuesto inorgánico está reaccionando con el cloro para formar nitrosaminas y así tener el efecto desinfectante (Jiménez, 2001), que observamos en las Figuras 4.24 y 4.25 respectivamente.

4.5 Resultados Domiciliarios

Como parte final de este trabajo, se muestrearon algunos domicilios en distintas delegaciones del Distrito Federal. Esto se hizo para conocer la calidad del agua que llega hasta los usuarios como consumidores finales.

4.5.1. Cloro residual libre

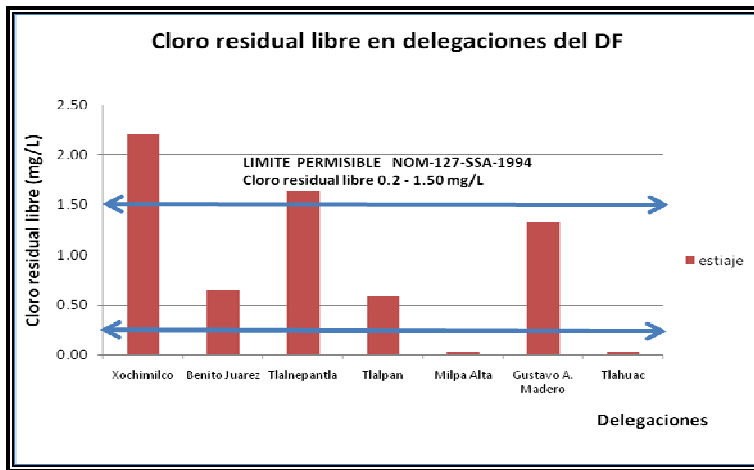


Figura 4.27. Cloro residual libre en delegaciones del Distrito Federal.

La mayoría de las delegaciones presentan un residual de cloro que se encuentra en los límites que establece la NOM-127-SSA1-1994 de 0.2 a 1.5 mg/L. Con esto se asegura la calidad microbiológica para los consumidores finales.

Sin embargo, las delegaciones Milpa Alta y Tláhuac no tiene la concentración de cloro residual establecido por la Norma mexicana (fig. 4.27), esto se puede deber a que este análisis no se realizó *in situ*, sino que las muestras se trajeron al laboratorio 24 horas después de su recolección.

4.5.2. Carbono Orgánico Total

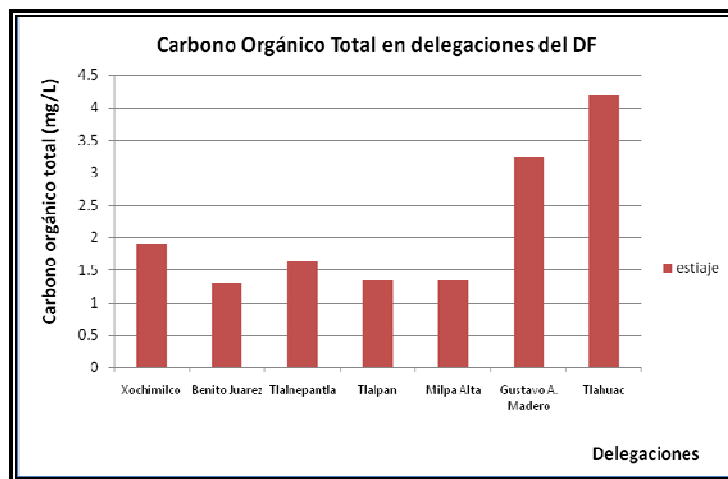


Figura 4.28. Carbono orgánico total en delegaciones del Distrito Federal.

Al no mencionarse al COT en la NOM-127-SSA1-1994, se hace importante la concentración de materia orgánica, puesto que, a lo largo de la red de distribución dicha materia contenida en los efluentes se ha oxidado hasta lo encontrado en la Figura 4.28, que como se observa, ha disminuido hasta una concentración máxima de 4 mg/L en la delegación Tláhuac.

4.5.3. Trihalometanos Totales

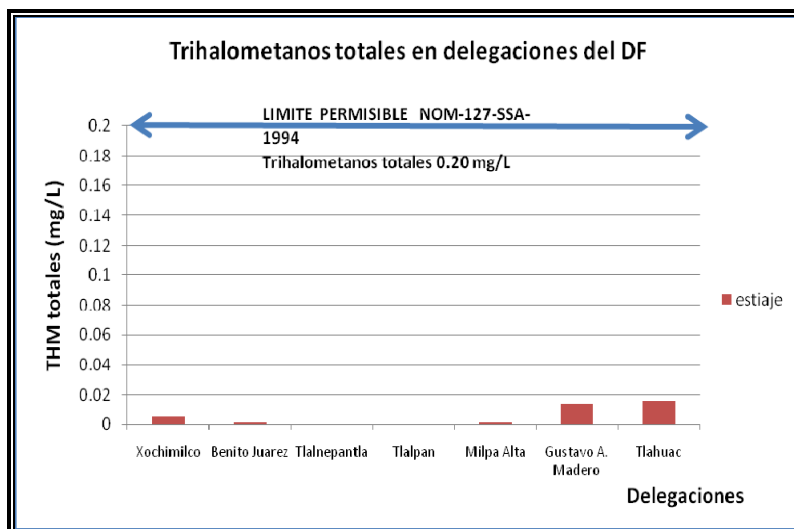


Figura 4.29. Trihalometanos totales en delegaciones del Distrito Federal

En la Figura 4.29, se observa que ninguna de los domicilios muestreados tiene el riesgo de aportar THMT a sus consumidores; es decir las bajas concentraciones se encuentran dentro de la NOM-127-SSA1-1994, así como de la EPA, que establecen límites máximos de THMT de 0.2 y 0.08 mg/L respectivamente.

4.5.4. Coliformes Totales

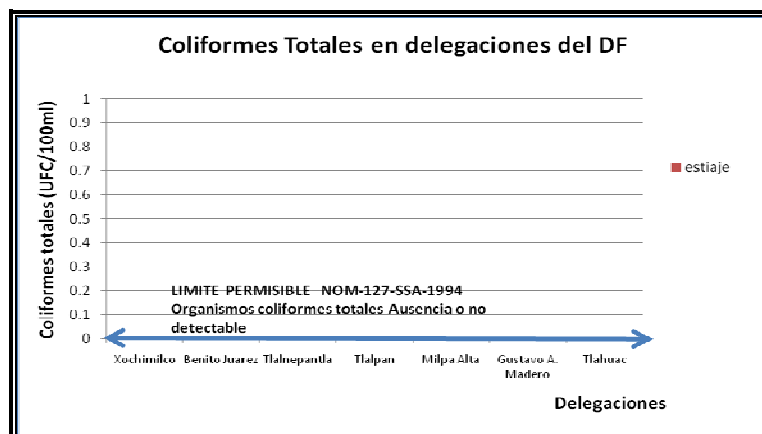


Figura 4.30. Coliformes Totales en delegaciones del Distrito Federal.

Como se puede observar, todas las delegaciones muestreadas presentan ausencia de coliformes totales, luego entonces, se cumple con lo que se establece la NOM-127-SSA1-1994, de 2 UFC/100ml.

Cabe señalar que en la Figura 4.27, la delegación Milpa Alta y Tláhuac no tienen un residual suficiente para lograr lo que se observa en la Figura 4.30. Esto puede deberse a que existen otros compuestos que están inhibiendo la presencia de estos microorganismos.

4.5.5. Coliformes Fecales

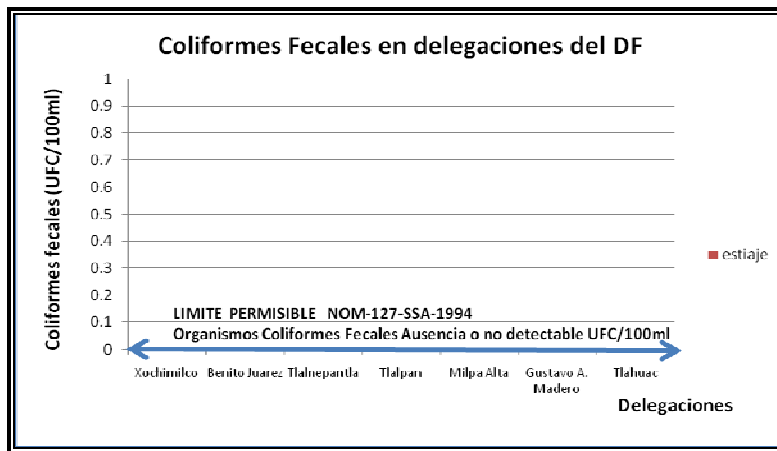


Figura 4.31. Coliformes Fecales en delegaciones del distrito Federal.

Al igual que en la Figura 4.30, aquí se observa que todas las delegaciones muestreadas no presentan coliformes fecales tal y como se establece en la NOM-127-SSA1-1994, como ausencia de estos microorganismos.

Para ambas Figuras (4.30 y 4.31) se tiene el efecto de que algunos compuestos están inhibiendo a los coliformes totales y fecales, especialmente en las delegaciones de Milpa Alta y Tláhuac.

4.5.6. Nitrógeno amoniacal

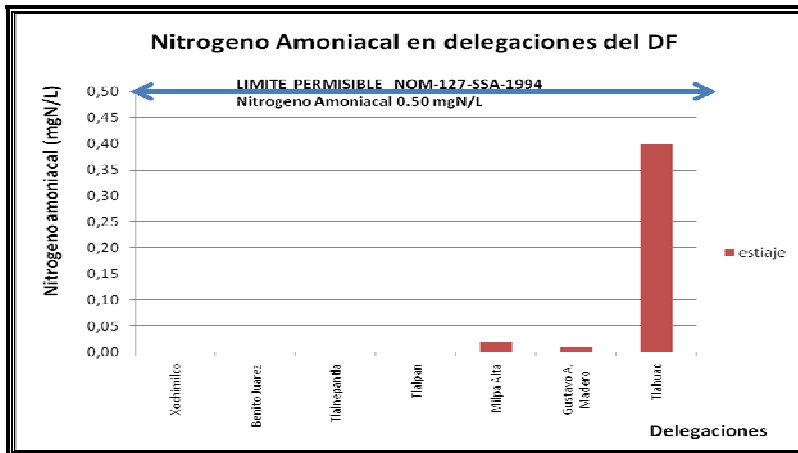


Figura 4.32. Nitrógeno amoniacal en delegaciones del Distrito Federal.

En las delegaciones Milpa Alta y Tláhuac, Figura 4.32, se tiene que la presencia de Nitrógeno amoniacal en ambas delegaciones, probablemente, esta reaccionando con el cloro residual y así formar las cloraminas que, finalmente su efecto desinfectante se observa en las figuras 4.30 y 4.31, respectivamente.

Por último, la NOM-127-SSA1-1994 establece como límite permisible una concentración máxima de 0.5 mg/L de nitrógeno amoniacal; esta concentración no es rebasada por ninguna de las delegaciones muestreadas.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el desarrollo de este trabajo se concluye que:

5.1. De los parámetros analizados en presas, se obtuvo que los THMT, Cloro libre y Nitrógeno Amoniacal no cumplen con lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994; sin embargo, CT y CF están por arriba de la norma, por lo que este comportamiento se considera normal por tratarse de presas de almacenamiento para una posterior potabilización.

5.2. Los Pozos muestreados se consideran de buena calidad al en cuanto a THMT y CF, puesto que cumplen con la NOM-217-SSA1-1994; sin embargo, con la presencia de materia orgánica existe la formación potencial e incremento de los THMT.

Tanto el Cloro libre, CT y Nitrógeno amoniacal, no cumplen con la Norma mexicana; estos parámetros se consideran como indicadores iniciales de calidad para una posterior potabilización.

5.3. Los tanques, que no son fuentes de suministro, en general presentan una calidad aceptable en cuanto a los parámetros, THMT, Cloro libre, CT, CF y Nitrógeno amoniacal; es decir, los resultados obtenidos se encuentran dentro de la NOM-127-SSA1-1994. Sin embargo, las concentraciones de materia orgánica, probablemente, causen el incremento de THMT al realizar una poscloracion.

5.4. Las plantas potabilizadoras, en los parámetros como THMT, CT y CF entran en los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994, siendo estos dos últimos parámetros afectados directamente por la presencia de Nitrógeno amoniacal y el Cloro residual, por la presumible formación de cloraminas. En

cuanto a la materia orgánica, se tendría que reducir la concentración de esta en alguno de los procesos de potabilización.

5.5. Los muestreos en las delegaciones revelaron que la calidad del agua que reciben los consumidores es en general, de buena calidad, puesto que los parámetros, THMT, Cloro libre, CT, CF y Nitrógeno amoniacal, se encuentran en lo establecido por la NOM-127-SSA1-1994.

RECOMENDACIONES

Las principales recomendaciones que se hacen es que, se dosifique y lleve adecuadamente la cloración para que de alguna forma se normalice la concentración de cloro residual en tanques y plantas potabilizadoras para llegar al usuario final.

En este mismo contexto, se recomienda capacitación al personal operativo para cumplir completamente con los protocolos de cloración.

Finalmente, los resultados obtenidos en este trabajo, pueden servir de base para la toma de decisiones para un monitoreo constante del agua en puntos estratégicos del sistema de distribución y así, verificar que se cumpla con el cloro residual libre de 0.2 a 1.5 mg/l establecido en la NOM-127-SSA1-1994.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez Ortega, E. (2009). Estudio de las características físicas y químicas de 19 fuentes de abastecimiento de agua potable al valle de México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Zaragoza, UNAM.
- APHA, AWWA, WEF (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health association. Washington, D.C., 20th ed.
- Caceres, L.O., (1990) Desinfección del agua. Ministerio de salud; Perú
- Cantor K. (1994) Water chlorination, mutagenecy and cancer epidemiology. Am J. Public Health 84:121-1213.
- Capella, Antonio V. (2000). Abastecimiento de agua a la zona metropolitana. Instituto de Ingeniería, UNAM. pp. 4-10, 31-35.
- Castelan, E. (2002). Los consejos de Cuenca en el desarrollo de las presas en México. Centro del tercer mundo para el manejo del agua. pp.103-149.
- Cohen Manuel Perló, González Reynoso Arsenio. (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, Fundación Frierich Ebers, Stifoung.
- Cooper, William J.; Zika, Rod G., y Steinhauert, Margaret S. (1985); Bromide-Oxidant interactions and THM Formation: A Literature Review. J. Am Water Works Assoc; 77(4):116-121.
- CYTED, 2003. Red Iberoamericana de Ciencia y Tecnología, Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. www.cyted.com
- CONAGUA. El quehacer de la infraestructura hidroagrícola en México, (2001-2006), pp.110-112.
- Environmental Protection Agency, EPA (1979) National interim primary drinking water regulations: control of trihalomethanes in drinking water. Washington, D.C.
- Environmental Protection Agency, EPA (1998) Stage 1 Disinfectants and Disinfection by products Rule. Ground Water and Drinking Water, EPA 815-F-98-010.
- Environmental Protection Agency, EPA (1999) Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual. EPA 815-R-99-014.
- Ezcurra, E. H, Cot leer-Avalos, M. Mazari-Hiriart; anda J. de Anda. (2006). Atlas de la Cuenca Lerma- Chapala. Instituto Nacional de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fonseca Montes de Oca, Reyna María Guadalupe (2004) Estudio de la formación y distribución de Trihalometanos en agua potable de la zona norte de la ciudad de

- Toluca. Tesis de maestría en ciencias del agua. Centro Interamericano de Recursos del Agua. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Grabow Wok, (1996): Waterborne diseases: Update on water quality assessment and control. *Water SA*, 22:193–202.
- Hard, G.C., Boorman, G.A., Wolf, D.C., (2000). Re-evaluation of the 2-years chloroform drinking water carcinogenicity bioassay in Osborne-Mendel rats supports chronic renal tubule injury as the mode of action underlying the renal tumor response. *Toxicol. Sci.* 53 (2), 237-244.
- IARC, (2004). Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Some Drinking-water Disinfectants and Contaminants, Including Arsenic, vol. 84, International Agency for Research on Cancer, Lyon, France.
- INEGI (2007). Censo General de Población y Vivienda. <http://www.inegi.gob.mx>
- Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua, (2003). IMTA, <http://www.imta.gob.mx>
- Ivancev-Tumbas I., Dalmacija B., Tamas Z., Karlovic E., (1999). The effect to different drinking water treatment processes on the rate of chloroform formation in the reactions of natural organic matter with hypochlorite, *Water Research*, 33, 18; 3715-3722.
- Jiménez Blanca; Orta, Teresa; Beltrán, Norma; Maya, Catalina; López, Miriam y Montes, Raquel (2000). Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento. Desinfección. Manual de diseño de agua potable alcantarillado y saneamiento.
- Jiménez Blanca., (2001). La contaminación Ambiental en México: Causas, Efectos y Tecnología apropiada. , Colegio de Ingenieros Ambientales de México., pp. 252-254.
- Jiménez Blanca., Luis Marín., (2004). El agua en México vista desde la Academia Mexicana de Ciencias.
- Kim, Hyun-Chul y Yu, Myong-Jin (2005). Characterization of natural organic matter in conventional water treatment processes for selection of treatment processes focused on DBPs control. *Water research*; 39:4779-4789.
- Madigan T., John. M., Parker J., Brock (2004). *Biología de los microorganismos*, 10ª Edición. Editorial Pearson, S.A., Madrid España.
- Metcalf & Eddy (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. Fourth edition. Mc Graw Hill.
- NOM 014-SSA1-1993., Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados.

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.

NOM-230-SSA1-2002., Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.

Organización Mundial de la Salud, OMS (2004). Guidelines for Drinking-water Quality. Vol. 1. Third Edition. Geneva. ISBN 92 4 154638 7.

Owen, D.M., Amy, G.I., Chowdhury, Z.K., Paode, R., McCoy, G. y Viscosil, K. (1995). NOM characterization and treatability. J. AWWA 87, pp. 46-68.

Pedersen, Michael. 2004. Los sistemas de PDU reducen los riesgos de COVs-EI tratamiento en la llave no hace todo el trabajo.
<http://www.agualatinoamerica.com./docs/PDF/091004Nivel1.pdf>.

Richardson, S.D. (1998). Drinking water disinfection by-products, Encyclopedia Environ. Anal. Remed. 1398-1421

Richardson, S.D., Plewa Michael J., Wagner Elizabeth D., Shoeny Rita., Demarini David M. (2007). Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by products in drinking water: A review and roamp for research. Mutation Research 636, 178-242.

Singer, Philip C. (1998). Formation and Control of Trihalomethanes. In: Disinfection By-products: Current Perpectives. Am Water Assoc; pp. 219-237.

Sistema Cutzamala "Agua para millones de Mexicanos" (2005). Recursos Naturales y Pesca. Secretaria del Medio Ambiente, México. Comisión Nacional del Agua, SEMARNAT.

Trujillo Machado J. (2006). Evaluación del ácido peracético, radiación ultravioleta y cloro para la desinfección de una fuente convencional de agua (valle de Tula). Tesis de maestría. Instituto de Ingeniería UNAM.

UNESCO. (2003). Año Internacional del Agua Dulce 2003.

<http://www.wateryear2003.org/es/ev.php-URL ID=1600&URL DO=DO TOPIC&URL SECTION=201. html>

Water Environment Research Foundation, WERF (1995). por Darby, J., Heath, M., Jacangelo, J., Loge, F., Swaim, P. y Tchobanoglous, G. Comparison of UV irradiation to chlorination: guidance for achieving optimal UV performance. Project 91-WWD-1.

White, G. (1992). Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants. 4ta Edición. New Cork.

Wetzel, G. R., (1981). Limnología. Editorial Omega, Barcelona España. pp. 679.

ANEXO

DATOS DE MUESTREOS								
SITIO		CG1 MACROCIRCUITO	CG2 LOS REYES	CG MEZCLA	QUETZALCOATL	TANQUE XALTEPEC	TANQUE LA CALDERA	POZO 310
ANALISIS FQ DE AGUA POTABLE	UNIDADES	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN
Solidos Suspendidos Totales (SST)	mg.L-1	1	1.0	0.0	0.0	0.0	1	1.0
Solidos Disueltos Totales (SDT experimental)	mg.L-1	162	162.0	161.0	200	338	826	162
Solidos Disueltos Totales (SDT aparato)	mg.L-1	49.8	49.8	269.0	33.0	59.4	129.6	123.5
Carbon Organico Total (COT)	mg.L-1	0.25	0.25	0.20	4.65	3.10	2.1	2.7
Nitrogeno Amoniacal (mg N-NH3)	mg.L-1	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	1.18	0.56
Nitritos	mg.L-1	0.003	0.003	0.00	0.003	0.003	0.013	0.003
Nitratos	mg.L-1	1.3	1.3	1.63	2.80	2.87	2.7	4.1
Nitrogeno Total Kjendhal (NTK)	mg.L-1	1.45	1.45	0.85	1.23	1.37	0.90	0.15
Ortofosfatos (PO4-)	mg.L-1	0.07	0.07	0.03	0.0	0.1	1.0	0.4
Alcalinidad	mg.L-1	62.67	62.67	83.00	67.0	66.0	251.50	263.50
Temperatura	oC	17.7	17.7	21.9	22.2	24.5	25.2	26.0
pH	pH unit	6.87	6.87	7.25	6.99	7.30	7.12	8.06
Turbiedad	UNT	0	0.00	0.00	0.04	0.00	0.90	0.00
Cloro libre	mg Cl . L-1	0.28	0.28	0.41	0.85	0.26	0.21	0.05
Analisis relacionados con salinidad								
Cloruros	mg.L-1	9.1	9.1	11.25	2.15	15.88	40.70	39.21
Conductividad electrica	µS/cm-1	104.8	104.8	555.0	69.9	124.8	270	257.3
Potencial de oxido-reduccion	mV	16.2	16.2	-5.9	-2.1	-19.5	-8.6	-63.3
Dureza Total	mgCaCO3.L-1	11.3	11.3	24.0	74.7	117.3		
Dureza de Calcio	mgCaCO3.L-1	4	4.0	7.0	26	26		
Dureza de Magnesio	mgCaCO3.L-1	1.7	1.7	4.1	12.4	12.4		
Sulfatos	mg.L-1	3	3.0	22	56	45	14	11
THM'S								
THMtotales	ppb CHCl3	37	37	55	40	18	26	0.0
Analisis microbiologicos								
Coliformes Totales (35 - 37°C)	UFC/100 mL	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Coliformes Fecales (44,5 °C)	UFC/100 mL	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND = No detectado

CG = Cerro Gordo

NO determinado por falta de equipo

n.d. = no determinado

PRESA MADIN EFLUENTE	COYOTEPEC	TULTITLAN	POZO CHALCO	POZO GEO	PLANTA POTABILIZADORA STA. CATARINA 13 INFLUENTE	PLANTA POTABILIZADORA STA. CATARINA 13 EFLUENTE	PLANTA POTABILIZADORA STA. CATARINA 10 INFLUENTE	PLANTA POTABILIZADORA EL SIFON INFLUENTE	PLANTA POTABILIZADORA EL SIFON EFLUENTE
LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN
2.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.33	1.67	6.0	0.0	1.0
161.0	633.0	422.0	161	554	1083	1183	1582	1414.0	1413.0
25.5	175.3	107.4	64.4	159.17	264.33	364.00	371.00	334.0	347.0
1.1	9.1	5.0	0.85	3.6	12.1	14.55	17.9	17.60	13.20
0.20	0.02	0.01	0.03	0.05	0.45	0.00	por encima del rango	por encima del	0.20
0.014	0.004	0.005	0.004	0.002	0.004	0.005	0.005	0.012	0.003
1.70	3.95	3.10	2.5	1.50	2.07	2.53	2.3	N.D	1.30
3.63	3.93	0.50	0.95	0.7	1.07	1.27	4.1	4.15	0.07
3.3	0.4	0.4	0.5	0.10	2.5	1.43	2.4	5.50	2.67
208.0	966.0	526.0	181.67	317.0	808.0	562.0	751.0	525.00	355.33
20.5	25.6	24.7	21.6	26.7	20.57	20.80	19.97	23.8	23.3
6.99	7.19	6.84	7.03	7.15	7.59	7.88	7.89		
25.63	0.00	0.00	0.00	0.00	1.35	0.00	25.14	0.00	0.00
0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.43	0.02	0.00	0.16
5.79	21.51	22.83	4.47	42.68	234.25	227.31	404.98	12.24	122.59
54.2	363.7	224.0	135.2	331.0	545.67	145.87	761.0	686.0	713.0
9.9	-8.8	11.4	-3.4	13.1	-38.33	-55.03	-55.33		
27.0	42.67	36.7		31.0	342.7	19.8	531.0	233.0	196.0
4.0	8.0	14.0		10.0	169.3	180.7	170.0	534.0	214.7
8.0	7.8	5.5		5.1	42.1	52.0	87.2	0.0	0.0
20.0	42.0	27.0	1.0	40	196	148	520	480.0	424.0
76.73	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	53	0.00	21	68
4x10	N.D	N.D	3	4	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
11	N.D	N.D	ND	ND	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D

PLANTA POTABILIZADORA STA. MA. AZTAHUCAN INFLUENTE	PLANTA POTABILIZADORA STA. MA. AZTAHUCAN EFLUENTE	PLANTA POTABILIZADORA AGRICOLA ORIENTAL INFLUENTE	PLANTA POTABILIZADORA AGRICOLA ORIENTAL EFLUENTE	PLANTA POTABILIZADORA SANTA CRUZ MEYEHUALCO INFLUENTE	PLANTA POTABILIZADORA LOS BERROS INFLUENTE	PLANTA POTABILIZADORA LOS BERROS EFLUENTE	PRESA VALLE DE BRAVO	PRESA VILLA VICTORIA
LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN	LAB. IINGEN
1.0	1.0	4.0	3.0	2.0	6.0	0.0	16.0	13.0
1426.0	1429.0	845.0	1521.0	1563.0	95.0	87.0	105.0	113.0
359.7	357.7	406.0	406.3	359.7	33.8	46.8	34.2	31.8
15.35	12.60	14.50	15.50	6.30	2.00	1.57	1.40	6.45
por encima del rango	por encima del	por encima del rango	por encima del	por encima del rango	0.04	0.02	0.03	0.05
0.001	0.001	0.004	0.044	0.003	0.004	0.002	0.007	0.004
2.63	3.20	7.0	1.70	1.97	2.23	1.43	1.63	1.37
4.25	3.15	5.80	6.77	3.05	0.20	0.10	0.70	0.45
3.07	2.77	1.50	1.13	1.40	0.65	0.13	0.13	0.37
738.67	438.00	1181.0	1228.0	578.0	67.0	61.5	92.5	72.0
25.2	22.7	26.1	26.2	23.8	16.2	16.4	20.7	-3.4
		7.23	7.65	7.98	7.414	6.530	7.609	8.330
10.90	18.76	4.77	7.91	0.00	5.79	0.00	35.33	14.69
0.07	0.04	0.05	0.10	0.05	0.08	0.67	0.05	0.14
72.96	63.69	154.68	157.08	80.65	4.96	5.62	3.97	2.98
738.7	733.7	831.3	831.0	737.7	71.5	72.4	72.5	67.5
	-55.7	-15.5	-39.5	-58.6	-28.3	23.2	-38.7	-78.9
434.0	433.0	387.0	542.0	487.0	15.33	16.3	13.7	15.33
442.0	312.0	441.3	454.0	372.0	3.50	3.0	4.0	4.00
0.0	33.0	11.3	9.2	37.7	2.90	3.3	2.2	2.70
634.0	656.0				8.0	1.0	1.0	1.0
0.0	N.D	N.D	7	N.D	8.50	n.d	31.00	28.50
N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	24	ND	6	36
N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	4	ND	ND	11

