



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE QUÍMICA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

“DESINFECCIÓN FOTO-CATALÍTICA DEL AGUA PARA CONSUMO  
HUMANO USANDO LUZ SOLAR Y DIÓXIDO DE TITANIO (TiO<sub>2</sub>)  
INMOVILIZADO”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de maestro en  
Ciencias Ambientales

**Presenta:**

César Gutiérrez Rico

**Dirigido por:**

Dra. Lucero Robles Dávila

SINODALES

Dra. Lucero Robles Dávila  
Presidente

M. en C. Jesús Cárdenas Mijangos  
Secretario

Dra. Ana Martha Flores Flores  
Vocal

Dr. Guillermo Cabrera López  
Suplente

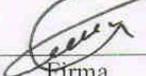
M. en C. Felipe Ortiz Arredondo  
Suplente

Q. B. Magali Aguilar Ortiz  
Directora de la Facultad

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Santiago de Querétaro, Qro.  
Junio de 2008  
México

## RESUMEN

Debido al consumo de agua con mala calidad microbiológica mueren de 10,000 a 20,000 niños diariamente (Carey y col., 2004). Así pues, es necesaria una tecnología para desinfectar el agua, que sea ambientalmente sostenible, y con ello minimice enfermedades de carácter hídrico. El proceso que cumple con lo anterior es SODIS (desinfección solar del agua), es por ello que el objetivo de esta investigación fue: desinfectar agua para consumo humano usando luz solar y dióxido de titanio inmovilizado en varilla de vidrio par reducir el tiempo de exposición solar. Se obtuvo, como resultados y conclusiones, que: se fijaron 49 varillas con  $\text{TiO}_2$  usando el método Dip-Coating (Kim y col., 2004) y el espesor de ellas no influyó en la inactivación de coliformes totales y fecales. La muestra inicial de agua tenía 3600 NMP/100 mL de coliformes totales y 2200 NMP/100 mL de coliformes fecales. Posterior a la aplicación del método SODIS/ $\text{TiO}_2$  se tuvieron valores, de coliformes totales y fecales, menores a 1.1 NMP/100 mL –a temperatura de 42° C y una exposición al sol, de 180 minutos-. Para la misma muestra, usando solamente el método SODIS, se requirieron 45° C y una exposición al sol de 5 horas. Posteriormente, ambas muestras se almacenaron en un lugar fresco y cada 24 horas se les determinó coliformes totales. Después de siete días, la muestra con SODIS/ $\text{TiO}_2$  permaneció menor a 1.1 NMP/100 mL y la que usó SODIS presentaba coliformes totales. Finalmente, se pudo concluir que el proceso SODIS/ $\text{TiO}_2$  es un coadyuvante en el proceso de desinfección del agua destinada para el consumo humano y además, después de siete días de almacenamiento, ésta mantiene sus propiedades que permiten que sea consumida con seguridad, ya que se da cabal cumplimiento con la normatividad mexicana.

**(Palabras Claves:** desinfección solar, dióxido de titanio inmovilizado, agua)

## SUMMARY

Everyday between 10,000 and 20,000 children die from drinking water that is microbiologically of bad quality (Carey and col., 2004). It is therefore necessary to use an environmentally sustainable technology for disinfecting water, thus minimizing diseases caused by water. The process that can accomplish this is SODIS (solar disinfection of water). As a result, the objective of this research was to disinfect water for human consumption using solar light and titanium dioxide immobilized on a glass bar to reduce exposure time to the sun. We found in our results and conclusions that: 49 bars were fixed with TiO<sub>2</sub> using the Dip-Coating method (Kim and col., 2004); their thickness did not influence the inactivation of total coliforms and fecal coliforms. The initial water sample had 3600 NMP/100mL of total coliforms and 2200 NMP/100mL of fecal coliforms. After applying the SODIS/TiO<sub>2</sub> method, we obtained total and fecal coliform values of less than 1.1 NMP/100mL at a temperature of 42°C and exposure to the sun of 180 minutes. For the same sample, using only the SODIS method, 45 °C and sun exposure of 5 hours were required. After, both samples were stored in a cool place, and every 24 hours total coliforms were determined. After seven days, the SODIS/TiO<sub>2</sub> sample remained at less than 1.1 NMP/100mL, and the sample using SODIS showed total coliforms. Finally, we were able to conclude that the SODIS/TiO<sub>2</sub> process helps in the process of disinfecting water for human consumption and that, in addition, after seven days of storage it maintains properties that allow it to be safely consumed, since it fully complies with Mexican standards.

(KEY WORDS: Solar disinfection, immobilized titanium dioxide, water)

## **DEDICATORIAS**

Para mí querida esposa Agustina Cano García, mi guía para elegir el mejor camino hacia mis sueños, a mis hijos Paula Paola, César Eliott y Agustín que son la luz que iluminan este camino.

A todas las personas que por vivir en lugares apartados, carecen de recursos para llevar una mejor calidad de vida.

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios por darme la oportunidad vivir todos estos momentos y disfrutar de lo que implicó la elaboración de este trabajo.

A mi familia que sin su apoyo no hubiera sido posible este logro.

A mis sinodales de tesis por sus recomendaciones y comentarios:

M. en C. Jesús Cárdenas Mijangos

Dra. Ana Martha Flores Flores

Dr. Guillermo Cabrera López

M. en C. Felipe Ortiz Arredondo

Muy especialmente a la Dra. Lucero Robles Dávila por sus sinceros comentarios.

Al Dr. Miguel Rea por su gran solidaridad.

A todos mis profesores por los conocimientos brindados durante todos mis estudios.

A mis compañeros de la maestría por su apoyo y amistad.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, al CEACA y al CONACYT por su gran soporte para alcanzar mi titulación.

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN</b>	i
<b>SUMMARY</b>	ii
<b>DEDICATORIAS</b>	iii
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	iv
<b>ÍNDICE</b>	v
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b>	viii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	ix
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA</b>	3
<b>2.1</b> Condiciones climatológicas de México	3
2.1.1 Temperatura ambiental y coordenadas geográficas de Querétaro	5
2.1.2 Precipitaciones pluviales	5
<b>2.2</b> Situación de los recursos hídricos en México	6
2.2.1 Aguas superficiales	7
2.2.2 Aguas Subterráneas	7
<b>2.3</b> Usos del agua e infraestructura	8
2.3.1 Usos del agua	8
2.3.2 Coberturas del agua potable	9
2.3.3 Agua y salud	10
<b>2.4</b> Microbiología del agua	14
2.4.1 Agua para consumo humano	14
2.4.2 Enfermedades de origen hídrico	15
2.4.3 Organismos indicadores de la contaminación biológica de agua	21
2.4.4 Clasificación del tipo de riesgo con el número de coliformes fecales	22
2.4.5 Estudios sobre de la calidad del agua en México	23

<b>2.5</b>	Marco legal en el cuidado de la calidad de agua para consumo humano	25
2.5.1	Vigilancia sanitaria de la calidad del agua para consumo humano	26
2.5.2	Control de la calidad del agua para consumo humano	27
2.5.3	Marco político institucional y responsabilidades	29
<b>2.6</b>	Procesos de desinfección del agua	31
2.6.1	Desinfección por calor artificial	32
2.6.2	Desinfección por rayos ultravioleta artificial	33
2.6.3	Desinfección con Cloro	37
2.6.4	Desinfección con Bromo	39
2.6.5	Desinfección con Plata coloidal	40
2.6.6	Desinfección con ozono	44
2.6.7	Desinfección por radiación solar	49
<b>2.7</b>	Proceso de desinfección solar (SODIS)	50
2.7.1	Mecanismos del proceso SODIS	52
2.7.2	Energía solar	53
2.7.3	Factores que influyen sobre el proceso de SODIS	55
2.7.4	Ventajas del proceso de SODIS	57
2.7.5	Limitaciones del proceso del SODIS	58
2.7.6	Aplicación del proceso SODIS	58
<b>2.8</b>	Procesos de oxidación avanzada (AOPs)	59
<b>2.9</b>	Foto catálisis	60
<b>2.10</b>	Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> )	61
 <b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA</b>		 64
<b>3.1.</b>	Inmovilización de dióxido de titanio sobre varillas de vidrio	64
<b>3.2.</b>	Desinfección solar con diferentes concentraciones de TiO <sub>2</sub>	66
<b>3.3.</b>	Comparación de la velocidad de inactivación de coliformes totales y Coliformes fecal con SODIS y SODIS/TiO <sub>2</sub> inmovilizado	71

<b>3.4.</b>	Recrecimiento de coliformes totales en el proceso SODIS y SODIS con TiO <sub>2</sub>	72
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>		<b>73</b>
<b>4.1.</b>	Resultados de Inmovilización de TiO <sub>2</sub> sobre varillas de vidrio	73
<b>4.2.</b>	Resultados de la desinfección solar con diferentes concentraciones de TiO <sub>2</sub>	76
<b>4.3.</b>	Resultados de la Comparación de la velocidad de inactivación de coliformes totales y Coliformes fecal con SODIS y SODIS/TiO <sub>2</sub>	80
<b>4.4.</b>	Resultados de recrecimiento de coliformes totales en el proceso SODIS y SODIS con TiO <sub>2</sub>	89
<b>CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		<b>91</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>93</b>
<b>LISTA DE SIMBOLOGÍA Y ABREVIATURAS</b>		<b>98</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>		<b>Página</b>
2.1	Temperaturas en Querétaro del período 1951-1980.	5
2.2	Precipitación media mensual histórica (mm) en el periodo 1941-2002 .	6
2.3	Cobertura del agua potable y alcantarillado, porcentaje de población que cuenta con los servicios (CNA, 2004).	9
2.4	Mortalidad por causas específicas (muertes x 1.000)	16
2.5	Morbilidad por causas específicas (casos x 1.000)	16
2.6	Principales enfermedades de origen hídrico	19
2.7	Bandas espectrales de la energía sola y efecto atmosférico	54
3.1	Matriz experimental a diferentes concentraciones de TiO <sub>2</sub>	67
3.2	Matriz Experimental para la desinfección SODIS y SODIS/TiO <sub>2</sub> Inmovilizado	71
4.1	Resultados de inmovilización de TiO <sub>2</sub> . en varillas de vidrio	73
4.2	Resultados promedio con concentración de 0.2880 mg/ml de TiO <sub>2</sub>	77
4.3	Resultados promedio con concentración de 0.5011 mg/ml de TiO <sub>2</sub>	77
4.4	Resultados con concentración de 1.0073 mg/ml de TiO <sub>2</sub> de TiO <sub>2</sub>	78
4.5	Resultados promedio del tiempo de inactivación de coliformes totales comparando los métodos: SODIS y SODIS/TiO <sub>2</sub>	80
4.6	Resultados promedio de la inactivación de coliformes fecales comparando los métodos: SODIS y SODIS/TiO <sub>2</sub>	81
4.7	Resultados del recrecimiento de coliformes totales entre SODIS y SODIS/TiO <sub>2</sub> .	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
2.1	Porcentaje de la estructura de la superficie continental por tipo de clima	4
2.2	Componentes del ciclo hidrológico, valores medios anuales en km <sup>3</sup>	6
2.3	Volúmenes de agua concesionados para usos fuera del cuerpo de agua (%) acumulado a diciembre de 2002	8
2.4	Cobertura de agua potable en México	9
2.5	Cobertura de agua potable en Querétaro	10
2.6	Mortalidad por enfermedades diarreicas en menores de 5 años por entidad federativa del año 2000.	12
2.7	Porcentaje de cobertura de agua y tasa de mortalidad por gastroenteritis infantil (1990-2001).	13
2.8	Porcentaje de enfermedades en el mundo	18
2.9	Estaciones de monitoreo en cuerpos de agua superficial, ubicadas en cada categoría de DQO (Situación al año 2003).	24
2.10	Interrelación entre el control y la vigilancia sanitaria de la calidad del agua para consumo humano.	29
2.11	Lámpara de luz ultravioleta	33
2.12	Instalación típica de un equipo de radicación UV con lámpara fuera del agua	34
2.13	Equipo electrolítico de plata típico	42
2.14	Generador Dieléctrico de Ozono	48
2.15	Distribución Mundial de la radiación solar	55
2.16	Proceso SODIS	59
2.17	Mecanismo de un foto-catalizador	60
2.18	Mecanismo del dióxido de titanio	62
3.1	Toma de muestra en Hoya de Álvarez del municipio de Valle de Santiago	66
3.2	Método de sustrato cromogénico para determinar coliformes totales	69
3.3	Método de sustrato cromogénico para determinar coliformes fecales	70
4.1	Varillas fijadas con dióxido de titanio inmovilizado	75

4.2	Espesor de la capa de dióxido de titanio inmovilizado sobre varillas	76
4.3	Reactor batch con varillas de vidrio fijas con TiO <sub>2</sub>	76
4.4	Inactivación de coliformes totales en función de la concentración de TiO <sub>2</sub>	78
4.5	Inactivación de coliformes fecales en función de la concentración de TiO <sub>2</sub> .	79
4.6	Efecto de la inactivación de coliformes totales entre la comparación de la aplicación del método SODIS y SODIS/TiO <sub>2</sub>	81
4.7	Efecto de la inactivación de coliformes fecales entre la comparación de la aplicación del método SODIS y SODIS/TiO <sub>2</sub>	82
4.8	Variación de temperaturas realizadas en diferentes días para el método de SODIS y SODIS/TiO <sub>2</sub>	83
4.9	Comunidad Cumbres del Conin, localizada a 20.57956° de latitud norte y 100.32333° de longitud oeste	84
4.10	Recipientes donde depositan y almacenan el agua de pipa	85
4.11	Temperatura adquirida por el agua dentro del reactor <i>batch</i>	86
4.12	Efecto de la inactivación de coliformes totales con respecto al tiempo usando SODIS/TiO <sub>2</sub>	87
4.13	Efecto de la inactivación de coliformes totales con respecto a la temperatura usando SODIS/TiO <sub>2</sub>	88
4.14	Determinación de recrecimiento de coliformes fecales entre SODIS y SODIS/TiO <sub>2</sub>	90

## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

Mundialmente, 1100 millones de personas carecen de acceso al agua potable y el promedio de muertes anuales por enfermedades diarreicas supera los 2 millones de personas (ONU, 2000). Aunado a esto, como resultado del consumo de agua con mala calidad microbiológica, se estima la muerte de 10,000 a 20,000 niños diariamente (Carey y col., 2004). Sin embargo, a pesar de que en México se cuenta con 439 plantas potabilizadoras de agua, cerca de 12 millones de personas carecen de este servicio y esto tiene como consecuencia una media nacional de mortalidad por enfermedades diarreicas, en menores de 5 años, de 23.24 por cada 100 mil habitantes; en el estado de Querétaro se presenta una mortalidad superior a la media nacional (CNA, 2004).

En numerosas ocasiones el agua que llega a las viviendas de muchas comunidades rurales proviene de manantiales, ríos, arroyos, ojos de agua u otros tipos de fuentes naturales superficiales expuestas a contaminación (Sánchez y col., 2000), por lo que se busca la necesidad de una tecnología para la desinfección del agua que sea barata y accesible para minimizar los incidentes de las enfermedades transmitidas por el agua.

El proceso de desinfección solar del agua (SODIS) es una tecnología simple, usada para mejorar la calidad microbiológica del agua para consumo humano, es un tratamiento ideal para pequeñas cantidades de agua, que utiliza botellas de plástico llenas de agua contaminada las cuales se exponen a la luz solar durante un periodo de seis horas. Este proceso requiere que el agua a desinfectar tenga una turbiedad menor a 30 unidades nefelométricas de turbiedad (UNT). El efecto de la inactivación de microorganismos en el proceso SODIS es atribuido al calentamiento por la radiación infrarroja y a la radiación ultra violeta A (UV-A) provenientes del sol (Sommer y col., 1997).

Los factores que mejoran la inactivación, por SODIS, de microorganismos contenidos en el agua, son: La baja turbiedad, la mayor cantidad de oxígeno disuelto en el agua, el uso de reflectores de luz que incrementen la incidencia solar hacia el agua, tal como papel aluminio (Kehoe y col., 2001). Existen varias investigaciones que demuestran que el SODIS es un proceso de desinfección efectivo y de bajo costo (McGuigan y col., 1998; Carey y col., 2004), mismo que, después de 20 años de investigaciones y proyectos

pilotos, ha ganado un reconocimiento importante, como su promoción por la Organización Mundial de la Salud (OMS) durante el día Mundial del Agua 2001 (WHO, 2001). En México existe poca difusión e investigación del proceso SODIS, uno de los más recientes estudios fue determinar la eficiencia en la desinfección agua para consumo humano en una comunidad rural de la Sierra Tarahumara en el estado de Chihuahua, donde se consume agua de ríos y de pozos artesanos sin tratamiento (Martín y col., 2004).

Una de las áreas de oportunidad para la investigación es reducir el tiempo de exposición solar requerido por SODIS. Una alternativa para incrementar la eficiencia en la desinfección del agua puede ser utilizando SODIS en combinación con los Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs, por sus siglas en inglés). Los AOPs son procesos fotocatalíticos que degradan compuestos orgánicos (incluso no biodegradables) en agua o aire (Vidal, 2001; Guillard y col., 2003). Hacen uso de compuestos, que producen radicales OH (\*OH) con exposición a luz ultravioleta (UV) (Malato y col., 2002), tales como dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), peroxodisulfato ( $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ) y ozono ( $\text{O}_3$ ) (Blanco y col., 2000). El  $\text{TiO}_2$  es el semiconductor más frecuentemente usado en foto-catálisis por su bajo costo, baja toxicidad, resistencia a la foto-corrosión y a su eficiencia catalítica (EPA, 1998; Transito, 2003).

Esta investigación muestra la mejora del proceso de desinfección solar (SODIS) del agua para consumo humano, a nivel doméstico, en lugares en los que la población consume agua contaminada por microorganismos patógenos, como una alternativa de solución simple, de bajo costo y ambientalmente sostenible. Para ello se implementó un reactor solar con  $\text{TiO}_2$  inmovilizado como catalizador donde se lleva a cabo el proceso de desinfección oxidativa solar de agua y se reduce el tiempo de exposición a la radiación solar, incrementando la eficiencia en la inactivación de coliformes totales y fecales utilizados como indicadores de la calidad del agua y con ello se da cumplimiento a la Norma NOM-127-SSA1-1994 "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización", respecto a la calidad microbiológica.

## **CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA**

El agua hace un medio ambiente saludable pero, paradójicamente, puede representar uno de los principales vehículos de transmisión de enfermedades, porque se estima que aproximadamente una tercera parte de la población de los países en desarrollo no tienen acceso al agua potable segura (Wegelin y col., 1994). Una estrategia para combatir este problema es el uso de la más abundante forma de energía, la luz solar, el cual tiene efectos bactericidas conocida desde hace muchos años (Downes y Blunt, 1877). Atribuido al efecto por el calentamiento (luz infrarroja) y por la producción de especies oxidantes (luz UVA y al oxígeno disuelto).

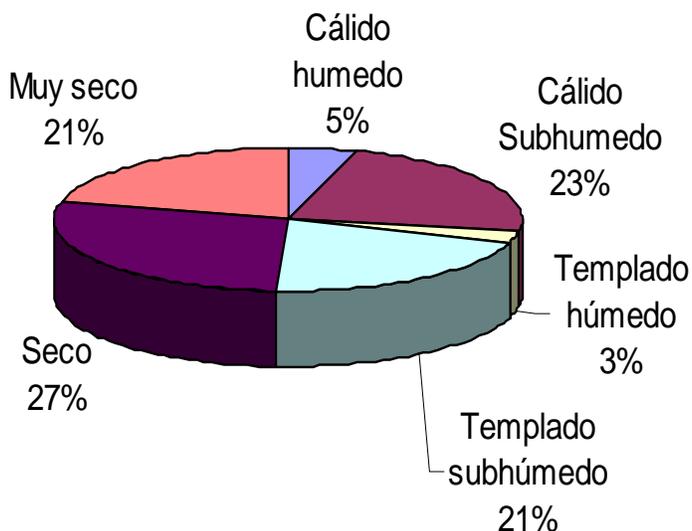
Para incrementar la producción de especies oxidantes se puede utilizar un foto catalizador, tal como el dióxido de titanio, el cual ha sido utilizado en investigaciones de procesos de oxidación avanzada para la descontaminación del agua y aire con compuestos químicos orgánicos persistentes y no biodegradables, el dióxido de titanio ha sido considerado como uno de los mejores métodos para la remediación del agua contaminada (Parra y col., 2002). En 1985, Matsunaga y colaboradores reportaron por primera vez el efecto microbici da de las reacciones foto catalíticas del  $TiO_2$  (Matsunaga y col., 1985), desde entonces trabajos de investigación sobre este foto catalizador han sido intensamente conducidas sobre un amplio rango de organismos incluyendo, virus, bacterias, hongos, algas y células cancerigenas (Bekbölet y Araz, 1996; Stevenson y col., 1997).

### **2.1 CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DE MÉXICO.**

La eficiencia de SODIS depende de la cantidad de luz solar disponible; sin embargo, la radiación solar se distribuye de manera irregular y su intensidad varía de una ubicación geográfica a otra, dependiendo de la latitud, la estación y la hora del día.

México cuenta con una gran diversidad de climas, los cuales de manera muy general pueden clasificarse, según su temperatura, en cálido y templado; y de acuerdo con la humedad existente en el medio en: húmedo, subhúmedo, seco y muy seco.

En la figura 2.1 se muestra el porcentaje de la estructura de la superficie continental por el tipo de clima, las temperaturas medias registradas por el clima seco son en promedio de 22° a 26° C en algunas regiones y en otras de 18° a 22° C; el muy seco de 18° a 22°C, con casos extremos de más de 26°C; el cálido húmedo entre 22° y 26°C y el cálido subhúmedo oscila de 22° a 26°C, en regiones supera los 26° C; el templado húmedo registra entre 18° y 22°C y el templado subhúmedo de 10° a 18° C y de 18° a 22°C, en algunas regiones puede disminuir a menos de 10°C (INEGI, 2004).



**Figura 2.1** Porcentaje de la estructura de la superficie continental por tipo de clima (CNA, 2004).

Con base en los datos mostrados en la figura 2.1 se observa que aproximadamente el 47% del territorio nacional presenta climas con temperaturas por arriba de 18°C lo que hace al país ser un lugar aceptable para la implementación del sistema de desinfección solar.

### **2.1.1 Temperatura ambiental y coordenadas geográficas de Querétaro**

Las coordenadas geográficas extremas de Querétaro son: Al norte 21° 40', al sur 20° 01' de latitud norte; al este 99° 03', al oeste 100° 36' de longitud oeste.

La aplicación de la metodología de desinfección solar se realizará en el estado de Querétaro por lo cual en el cuadro 2.1 se muestra la variación de las temperaturas máximas y mínimas en cada uno de los meses del año durante el periodo de 1951 a 1980.

**Cuadro 2.1** Temperaturas en Querétaro en el periodo 1951-1980 (CNA, 2004).

T ( °C )	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Annual
<b>Mínima promedio</b>	6.3	7.1	9.5	12	14	14	14	14	13	11	8.6	7	10.9
<b>Máxima promedio</b>	23	25	28	30	30	29	27	27	26	26	25	23	26.5

Como se observa en el cuadro 2.1 todos los meses del año presentan temperaturas máximas por arriba de 23°C , esto hace que Querétaro este clasificado como un clima semi-seco y la implementación de SODIS es adecuado para aplicar en esta zona del país.

### **2.1.2 Precipitaciones pluviales**

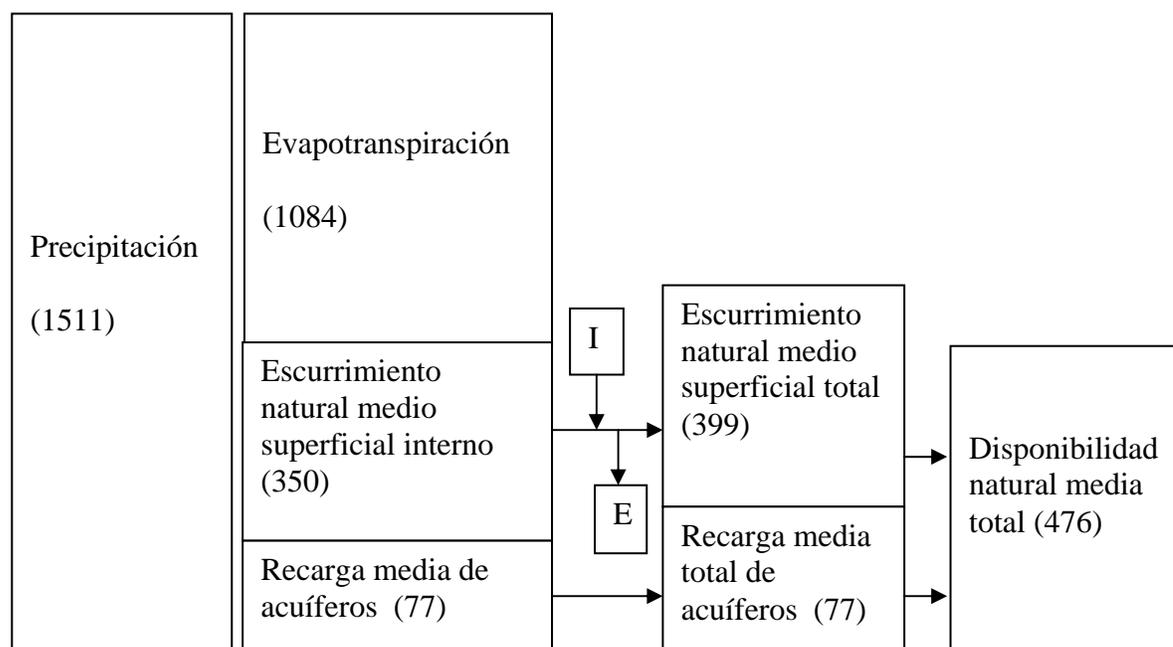
Uno de los factores que reduce la eficiencia del proceso SODIS son los días con cielo nublado y por supuesto no aplicaría para días con lluvia. En México la mayor parte de la precipitación se presenta en el verano (entre junio y septiembre), con excepción como la Península de Baja California. El resto del año la precipitación es escasa. A nivel nacional, el 67% de la precipitación se presenta entre junio y septiembre. (CNA, 2004). A continuación se muestra en el cuadro 2.2 la precipitación media mensual Nacional y de la entidad federativa de Querétaro.

**Cuadro 2.2** Precipitación media mensual histórica (mm) en el periodo 1941-2002 (CNA, 2004).

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
<b>Querétaro</b>	11	6	8	20	41	101	106	100	98	43	13	7
<b>Nacional</b>	26	18	15	19	40	103	138	136	141	74	32	29

Además, se puede observar en el cuadro 2.2 que los meses en que se presentan las más altas precipitaciones pluviales son de junio a septiembre, pero hay que considerar que esto no es un indicador de que en esos meses no se puede llevar a cabo el método de desinfección solar SODIS por que muy independientemente de la presencia de lluvia hay días soleados en los que se tienen temperaturas muy aptas para la aplicación de SODIS.

## 2.2 SITUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN MÉXICO



I= Importación de otros países 48.9  
E= Exportación de otros países 0.43

**Figura 2.2.** Componentes del ciclo hidrológico, valores medios anuales en km<sup>3</sup> (CNA, 2004).

Los componentes del ciclo hidrológico principales para nuestro país son la precipitación, la evapotranspiración, el escurrimiento natural medio superficial, la recarga de acuíferos y la disponibilidad natural media de agua. Como se observa en la figura 2.2, más del 70% del agua que llueve en el país se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el resto escurre por los ríos o arroyos o se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos.

### **2.2.1 Aguas superficiales**

En los ríos del país escurren aproximadamente 399 km<sup>3</sup> de agua anualmente, incluyendo las importaciones de otros países y excluyendo las exportaciones. Aproximadamente el 87% de este escurrimiento se presenta en los 39 ríos principales y cuyas cuencas ocupan el 58% de la extensión territorial continental del país (CNA, 2004). Es importante destacar que la ciudad de Querétaro se abastece principalmente de agua subterránea.

### **2.2.2 Aguas Subterráneas**

Para fines de administración del agua, el país se ha dividido en 653 unidades hidrogeológicas o acuíferos de los cuales 102 se encuentran sobreexplotados. De los acuíferos sobreexplotados se extrae aproximadamente el 57% del agua subterránea para todos los usos. Debido a la sobreexplotación, la reserva de agua subterránea se está minando a un ritmo de cerca de 6 km<sup>3</sup> por año. Se considera que un acuífero está sobre explotado cuando la extracción es superior a la recarga al menos en un 10% (CNA, 2004).

En la ciudad de Querétaro ya es un problema muy grande el abastecimiento de agua potable para los siguientes 20 años, por lo que el gobierno del estado, en conjunto con la Comisión Nacional del Agua, están en proceso de iniciar una obra millonaria para traer agua a la ciudad de Querétaro desde los manantiales del infiernillo.

## 2.3 USOS DEL AGUA E INFRAESTRUCTURA EN MÉXICO

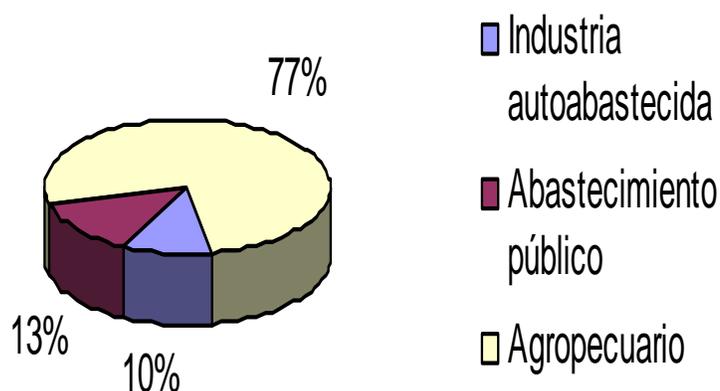
Los tres principales usos del agua en nuestro país son: el agropecuario, el abastecimiento público y el de la industria autoabastecida.

### 2.3.1 Usos del agua

Se distinguen dos tipos de usos del agua:

- A. Usos fuera del cuerpo de agua o usos consuntivos, en los cuales el agua es transportada a su lugar de uso y la totalidad o parte de ella no regresa al cuerpo de agua.
- B. Usos en el cuerpo de agua o usos no-consuntivos, en los cuales el agua se utiliza en el mismo cuerpo de agua o con un desvío mínimo, como en el caso de las plantas hidroeléctricas.

No se sabe con exactitud cuanta agua se utiliza en el país; sin embargo, se cuenta con el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) en el cual se tienen los volúmenes concesionados o asignados a los usuarios de aguas nacionales, los cuales se pueden observar en la figura 2.3.



**Figura 2.3** Volúmenes de agua concesionados para usos fuera del cuerpo de agua (%), acumulado a diciembre de 2002 (CNA, 2004).

### 2.3.2 Coberturas del agua potable

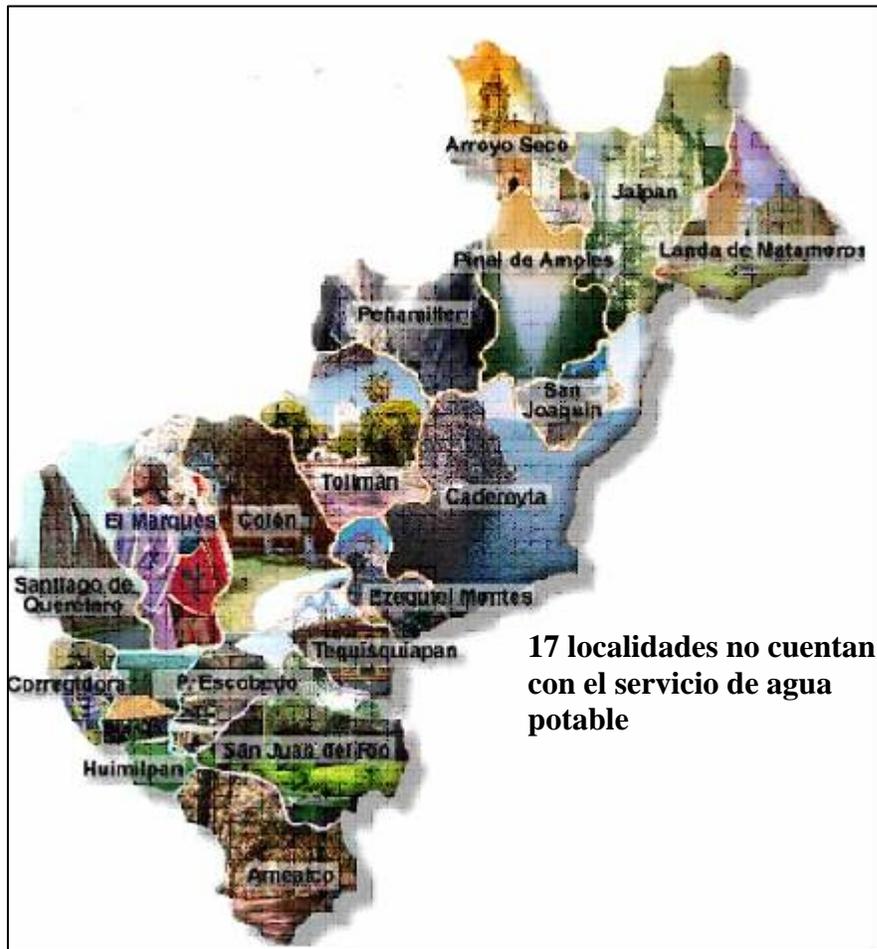
El agua en suficiente cantidad y buena calidad es esencial para la vida; sin embargo, a principios del año 2000, la sexta parte de la población mundial, es decir, más de mil millones de personas, no tenían acceso a un abastecimiento mejorado de agua potable y muchas más carecían de acceso a agua segura (Meierhofer y Wegelin, 2002). En nuestro país el 12.2% de la población no cuenta con el servicio de agua potable, siendo la población rural una de las más afectadas. El cuadro 2.3 nos brindan un panorama más amplio de las coberturas de agua potable en los últimos años. En la figura 2.4 se muestra el abastecimiento de agua potable en el estado de Querétaro.

**Cuadro 2.3** Cobertura del agua potable y alcantarillado, porcentaje de población que cuenta con los servicios (CNA, 2004).

Población	Censo 1980	Censo 1990	Conteo 1995	Censo 2000
<b>Agua Potable %</b>				
	%			
<b>Urbana</b>	Nd	89.4	92.4	94.9
<b>Rural</b>	Nd	51.1	62.5	68.3
<b>Total Nacional</b>	70.7	78.4	84.6	87.11



**Figura 2.4** Cobertura del agua potable en México (CNA, 2000).



**Figura 2.5** Cobertura del agua potable en Querétaro (SSA, 2006).

Como se puede observar en la figura 2.5 a pesar de los avances y el esfuerzo del gobierno por proporcionar una mejor calidad de vida, aun en el estado de Querétaro hay 17 localidades que no cuentan con agua potable y solamente considerando aquellas que están registradas. Esta es una razón más para buscar y apoyar proyectos que dan alternativas al problema ocasionado por el consumo de agua en malas condiciones bacteriológicas.

### **2.3.3 Agua y salud**

El agua para consumo humano ha sido definida en las Guías para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS), como aquella “adecuada para consumo humano y para todo uso doméstico habitual, incluida la higiene personal”. En esta

definición está implícito que el uso del agua no debería presentar riesgo de enfermedades a los consumidores.

El reconocimiento del agua como vehículo de dispersión de enfermedades data de hace mucho tiempo. Las enfermedades prevalentes en los países en desarrollo, donde el abastecimiento de agua y el saneamiento son deficientes, son causadas por bacterias, virus, protozoarios y helmintos. Esos organismos causan enfermedades que van desde ligeras gastroenteritis hasta enfermedades graves y fatales de carácter epidémico.

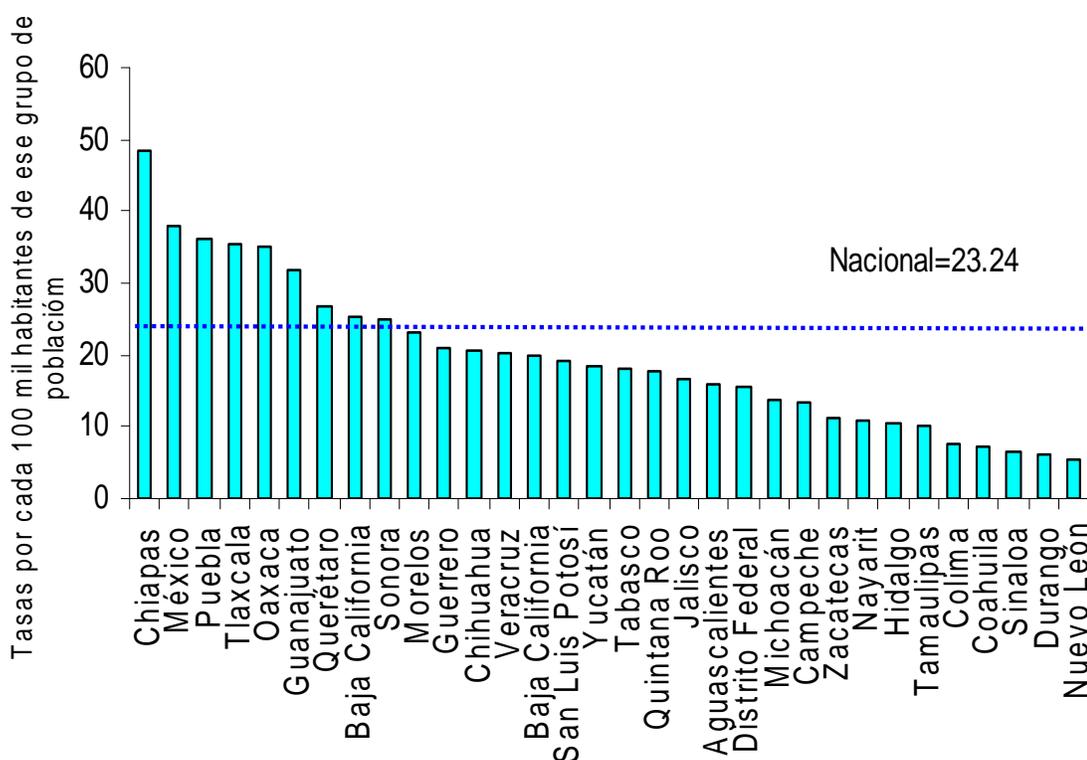
No obstante, la calidad del agua no es suficiente para asegurar beneficios a la salud humana; es necesario que adicionalmente se satisfagan tres aspectos: cantidad, continuidad y costo razonable. Al margen de las responsabilidades del abastecedor, los consumidores deben tener conocimientos sobre el uso apropiado del agua, de la adecuada nutrición e higiene de los alimentos, así como de la correcta disposición de excrementos. Precisamente, los mensajes dirigidos a mejorar los hábitos y costumbres relacionados con el buen uso del agua, deben realizarse a través de programas educativos y en forma complementaria a las actividades propias del abastecedor para evitar la impresión de que la calidad del agua por sí sola, previene las enfermedades.

El agua de calidad apta para consumo humano cuando entra al sistema de distribución puede deteriorarse antes de llegar al consumidor. En el sistema de distribución, la contaminación del agua puede ocurrir por conexiones cruzadas; retrosifonaje; tuberías rotas; grifos contra incendio, conexiones domiciliarias, cisternas y reservorios defectuosos; y durante el tendido de nuevas tuberías o reparaciones hechas con pocas medidas de seguridad. Otro factor de recontaminación, de gran importancia en las ciudades o localidades donde existe déficit de agua, es la interrupción del suministro como resultado de la rotación del servicio de una a otra área de abastecimiento con el fin de atender la demanda de agua.

De esta manera, en sistemas donde el servicio de abastecimiento de agua es restringido, el deterioro de la calidad física, química y principalmente microbiológica al nivel de las viviendas, es frecuente como consecuencia del manipuleo y almacenamiento inadecuado (Rojas, 2002).

La falta de acceso a agua de buena calidad provoca un riesgo de enfermedades transmitidas por el agua. Los esfuerzos por desinfectar el agua en nuestro país han experimentado una reducción muy importante de la mortalidad infantil por enfermedades diarreicas, así como la eliminación de casos de cólera, la tasa de mortalidad por enfermedad diarreica en menores de 5 años a nivel nacional en el año de 1990 era de 123 por cada 100 mil habitantes y en el año 2000 se redujo hasta un 23.24 por cada 100 mil habitantes.

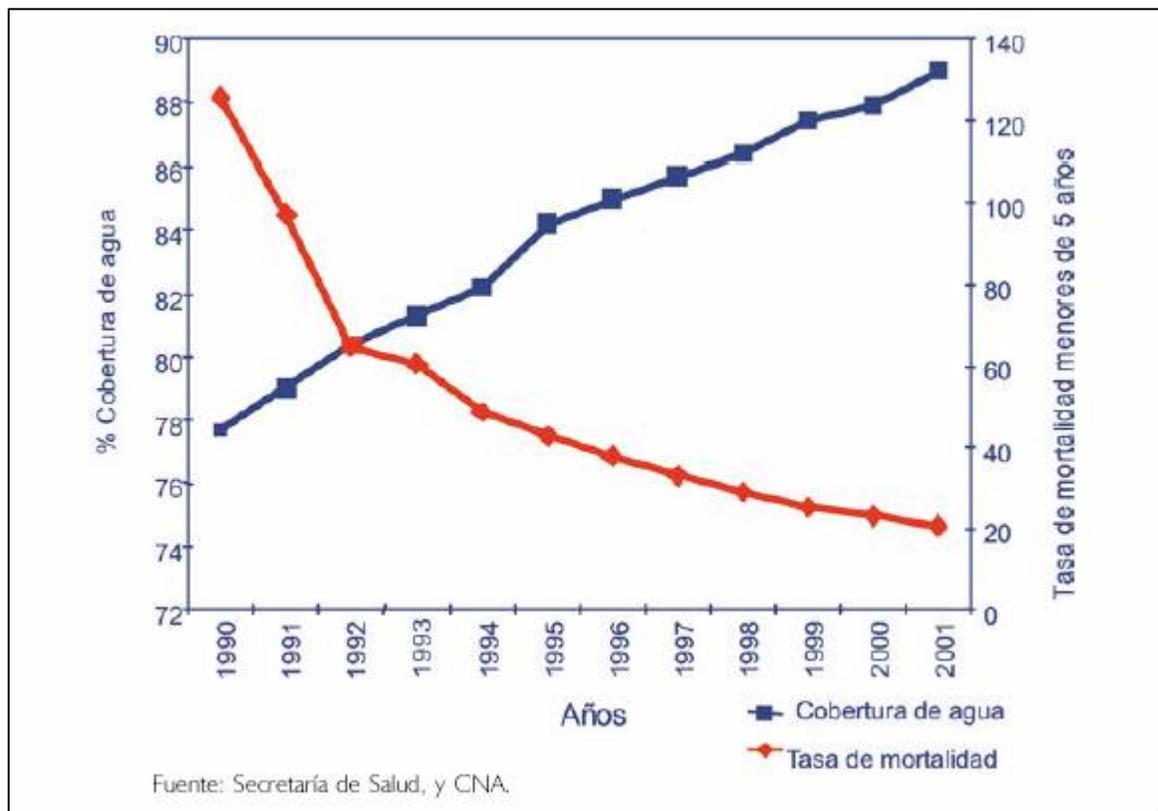
Querétaro, baja California sur y Sonora tienen una mortalidad superior a la media nacional, como se puede observar la figura 2.6.



**Figura 2.6** Mortalidad por enfermedades diarreicas en menores de 5 años por entidad federativa del año 2000 (CNA, 2004).

En el año 2000, la sexta parte de la población mundial, es decir, más de mil millones de personas, no tenían acceso a un abastecimiento mejorado de agua potable, muchas más carecían de acceso a agua segura. La falta de acceso a agua de buena calidad

provoca un riesgo de enfermedades transmitidas por el agua tales como: diarrea, cólera, fiebre tifoidea, hepatitis A, disentería amébrica o bacteriana y otras enfermedades diarreicas. Cada año, 4,000 millones de casos de diarrea causan 2,200 millones de muertes, mayormente entre niños menores de cinco años. Esto equivale a que un niño muera cada 15 segundos (Meierhofer y Wegelin, 2002).



**Figura 2.7.** Porcentaje de cobertura de agua y tasa de mortalidad por gastroenteritis infantil (1990-2001)

Como se observa en la figura 2.7, se muestra el porcentaje de cobertura de agua y tasa de mortalidad por gastroenteritis infantil del 1990 al 2001 y a pesar de que se ha logrado una tendencia de disminución, aun falta seguir trabajando para ofrecer a la población un agua desinfectada que cumpla con la normatividad mexicana.

## **2.4 MICROBIOLOGÍA DEL AGUA.**

El tipo de microorganismo encontrado en un ambiente acuático viene determinado por las condiciones físicas y químicas que prevalecen en ese ambiente. Estas condiciones ambientales varían de un extremo a otro dependiendo de la temperatura, luz, pH y nutrientes. Muchas de las bacterias del agua provienen del contacto con el aire, el suelo, animales o plantas vivas o en descomposición, fuentes minerales y materia fecal. La transmisión a través del agua de organismos patógenos ha sido la fuente mas grave de epidemias de algunas enfermedades.

### **2.4.1 Agua para consumo humano**

Agua potable: se conoce con este nombre al agua que ha sido tratada con el objetivo de hacerla apta para el consumo humano, teniendo en cuenta todos sus usos domésticos.

Algunas especies biológicas, físicas y químicas pueden afectar la aceptabilidad del agua para consumo humano. Por ejemplo:

- a) Su apariencia estética: turbiedad, olor, color y sabor, espuma.
- b) Su composición química: acidez, alcalinidad, aceites y grasas, compuestos orgánicos e inorgánicos en general.

Es necesario, asimismo, considerar las transformaciones químicas y bioquímicas a que están expuestos los contaminantes del ambiente acuático. Las alteraciones químicas pueden afectar su disponibilidad biológica o tóxica (aumentarla o disminuirla). Poco se sabe acerca de estos procesos químicos, físicos y biológicos y sus mecanismos, a pesar de que son indispensables para comprender los efectos en la salud del consumidor.

En México se ha decretado la NOM-127-SSA1-1994 que establece que el agua para consumo humano es aquella que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos al ser humano.

El agua de consumo humano de la mayor parte de las comunidades rurales sin acceso de agua potable proviene de aguas superficiales (ríos, arroyos y lagos). Estas aguas pueden estar contaminadas con residuos domésticos, agrícolas e industriales. Estos contaminantes se pueden clasificar en tres categorías: químicos, físicos y biológicos. Nos centraremos en los últimos. El agua puede comprometer a la salud y la vida si contiene microorganismos patógenos, basándose en la Norma NOM-127-SSA1-1994 "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización", la Norma NOM-201-SSA1-2002 "Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias".

#### **2.4.2 Enfermedades de origen hídrico.**

La OMS, estima que un 80% de las enfermedades de origen hídrico existentes en los países en desarrollo son producto de la contaminación del agua.

A solicitud de los cuerpos directivos de la OMS, a partir de 1995 se inició una serie de reportes anuales que llevan por título The World Health Report (Reporte de la Salud Mundial). Estos reportes son documentos concisos y analíticos, que proporcionan una visión del estado global de la salud, de las necesidades y problemas a los que deben hacer frente los sistemas de salud.

Si bien la intención inicial de la serie es proporcionar información a personal no médico como tomadores de decisión, planificadores, agencias donantes y otras organizaciones de apoyo internacional, dicha información también es de valor para expertos financieros, planificadores educativos, periodistas y público en general.

A continuación se resumen indicadores sobre diarrea (problema de salud relacionado con el agua de bebida) para que sean comparados con otros indicadores de alta ocurrencia.

**Cuadro 2.4** Mortalidad por causas específicas (muertes x 1.000) (OMS, 2002).

CAUSAS	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
<b>Enf. coronarias del corazón</b>	4.283	n. d.	7.200	7.200	7.375	7.089	6.894
<b>Enf. cerebro vasculares</b>	3.854	n. d.	4.600	4.600	5.106	5.544	5.101
<b>Infec. respiratorias agudas</b>	4.110	4.416	3.905	3.745	2.995	4.039	3.941
<b>Tuberculosis</b>	2.709	3.072	3.000	2.910	1.498	1.669	1.660
<b>Obstrucción crónica pulmonar</b>	2.888	n. d.	2.888	2.890	2.249	2.660	2.523
<b>Diarreas</b>	3.010	3.000	2.473	2.455	2.219	2.213	2.124

**Cuadro 2.5** Morbilidad por causas específicas (casos x 1.000)

CAUSAS	1995	1996	1997	1998
<b>Diarreas</b>	n. d.	4.002.000	4.002.000	4.000.000
<b>Malaria</b>	400.000	400.000	400.000	400.000
<b>Infec. respiratorias agudas</b>	n. d.	394.750	394.000	395.000
<b>Accidentes de trabajo</b>	n. d.	n. d.	160.000	250.000

En la edición de 1998 se realizó un análisis específico sobre el tema de diarreas y las conclusiones a las que se arribó fueron las siguientes (Con base en el cuadro 2.4 y 2.5):

"A pesar del mejoramiento de las condiciones generales socioeconómicas y de la elevación de la expectativa de vida, las enfermedades transmisibles se mantienen aún profundamente enraizadas. Viejas dolencias, como el cólera y la tuberculosis, aún dominan la escena. Los factores que inciden contribuyendo a la alta prevalencia incluyen la pobreza, la malnutrición, la ignorancia y tanto un medio circundante no saludable como la falta de agua de bebida segura. El crecimiento de la población y la rápida urbanización con una alta

cuota de hacinamiento han deteriorado y empeorado la situación, contribuyendo a la emergencia y re-emergencia de esas enfermedades infecciosas".

"Las diarreas continúan siendo la causa principal de la muerte infantil en los países sudasiáticos, con un 25% de los decesos en niños menores de 5 años. Hay más de un millón de muertes en menores de 5 cada año por causa de la diarrea."

La edición de 1996, por su parte, expresa:

"En la región de las Américas, las diarreas constituyen una de las 5 primeras causas de muerte en niños menores de un año y la causa más frecuente de muerte entre los niños de entre 1 y 4 años en numerosos países de la Región. Más aún, estas enfermedades son los mayores determinantes del retardo en el crecimiento y de malnutrición, lo que ayuda al mantenimiento del ciclo de la enfermedad. Las enfermedades diarreicas son, por lo tanto, uno de los problemas de salud que más afectan a los niños en las Américas.

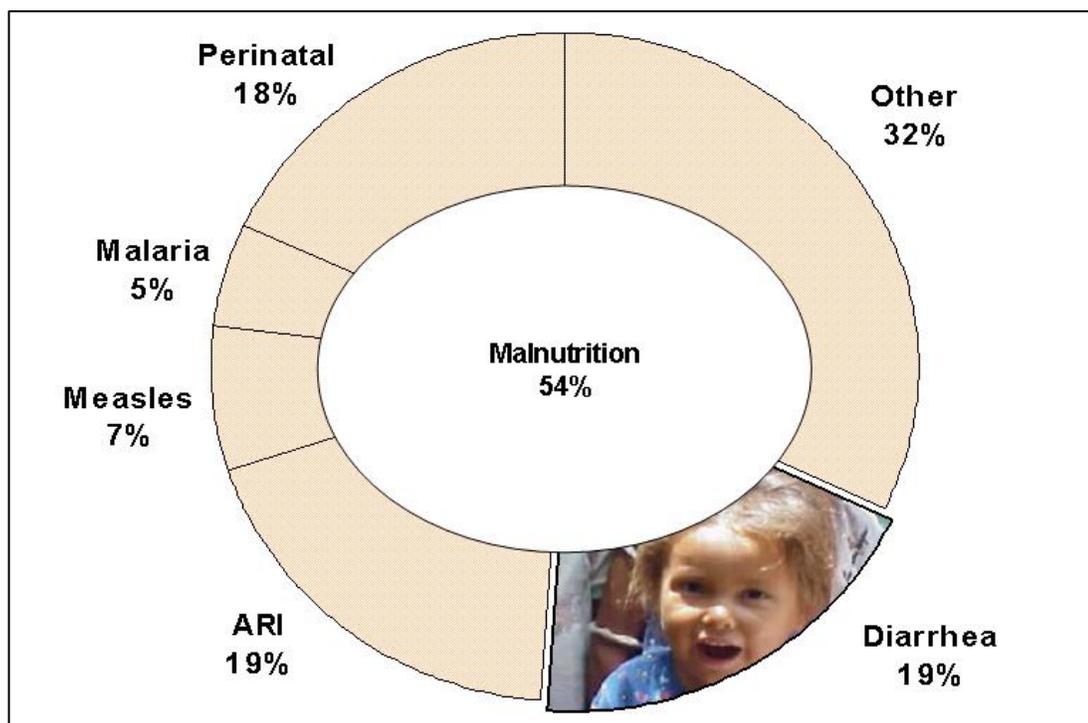
Asimismo, informa que: "En numerosas partes del mundo en desarrollo, el agua de bebida es colectada de fuentes alejadas de la vivienda y mantenida en recipientes hasta su uso, con lo que el agua puede contaminarse ya sea en la fuente o directamente durante su almacenamiento. Las estrategias para reducir las enfermedades de transmisión hídrica deben tener en cuenta ambas posibilidades. Nuevos sistemas de producción de desinfectantes y mejores diseños de recipientes para el almacenamiento ayudan a las familias a desinfectar las aguas inmediatamente después de su obtención y a mantenerla guardada en contenedores de boca estrecha, cerrados con tapa y especialmente diseñados para evitar la recontaminación. Esta estrategia de prevención de dos componentes es una forma práctica y económica en que las familias y las comunidades pueden protegerse contra una gran variedad de patógenos presentes en el agua de consumo, reduciendo así las altas tasas de morbi-mortalidad por diarreas".

"Numerosas pruebas de campo han sido llevadas a cabo en varias localidades de Bolivia, por el Ministerio de Salud, la OPS, el CDC y la USAID. Los métodos han sido bien aceptados y se han conseguido mejoramientos significativos en la calidad del agua almacenada, así como disminuciones en la casuística de las diarreas, especialmente en los menores de un año".

"Aparte de llevar agua segura a los hogares, la estrategia puede ser exitosamente aplicada en centros de salud, casas de ancianos, escuelas, refugios, venta ambulatoria y hasta durante los festivales locales".

"Las familias son educadas para usar agua desinfectada en el lavado de sus manos, de los alimentos, de los utensilios de cocina y para la preparación de la comida, todo lo cual implica una reducción de las enfermedades transmisibles. Aun enfermedades como el dengue pueden ser mejor controladas si se reduce el número de los contenedores de agua abiertos en los alrededores de las viviendas".

"Con el interés y apoyo de las comunidades y los ministerios de salud, las agencias de las Naciones Unidas, las organizaciones no gubernamentales y la industria privada, esta intervención de bajo costo podría ser implementada a escalas mayores". En la figura 2.8 se muestra el porcentaje de enfermedades en el mundo.



**Figura 2.8.** Porcentaje de enfermedades en el mundo (OMS, 2001)

En el cuadro 2.6 se muestran las principales enfermedades transmitidas por el agua.

**Cuadro 2.6** Principales enfermedades de origen hídrico (Romero, 2000)

<b>Enfermedad</b>	<b>Organismo causante</b>	<b>Fuente del organismo en el agua</b>	<b>Síntoma</b>
Gastroenteritis	<i>Salmonella</i>	Excrementos humano o de animales	Diarrea aguda y vómito
Tifoidea	<i>Salmonella typhosa</i>	Excrementos humano	Intestino inflamado, bazo agrandado, alta temperatura, fatal.
Disentería	<i>Shigella</i>	Excrementos humanos	Diarrea
Cólera	<i>Vibrio comma</i>	Excrementos humanos	Vómito, diarrea severa
Hepatitis infecciosa	<i>Virus</i>	Excrementos humanos, mariscos	Piel amarilla, dolores
Amibiasis	<i>Entamoeba hystolica</i>	Excrementos humanos	Diarrea, disentería crónica
Giardiasis	<i>Giardia lamblia</i>	Excrementos humanos y animales	Diarrea, retortijones.

Los efectos adversos en la salud humana ocasionados por el agua pueden dividirse en cuatro categorías:

**Enfermedades transmitidas por el agua.** Causadas por el agua contaminada por desechos humanos, animales o químicos. Incluyen el cólera, la fiebre tifoidea, la shigella, la poliomiелitis, la meningitis, la hepatitis A y E y la diarrea. La mayoría se puede prevenir con el tratamiento del agua residual antes de su uso.

Cada día mueren 6,000 personas (la mayoría niños) a causa de la diarrea (Egocheaga, 2004).

En 2001, murieron 1,96 millones de personas por diarrea infecciosa; 1,3 millones eran niños.

La diarrea ha provocado la muerte de más niños en los últimos 10 años que todos los conflictos armados ocurridos después de la Segunda Guerra Mundial.

Entre 1,1 y 2,2 millones de las muertes producidas por la diarrea pueden atribuirse al factor “agua, sanidad e higiene”; 90% de esas muertes corresponden a menores de cinco años.

En China, India e Indonesia el número de personas que mueren por causa de la diarrea es el doble del de las afectadas por el virus del SIDA (Egocheaga, 2004).

**Enfermedades con base en el agua.** Causadas por organismos acuáticos que pasan parte de su vida en el agua y parte como parásitos de animales. Incluyen la paragonimiasis, la clonorquiasis y la esquistosomiasis, causadas por diversos gusanos denominados helmintos, que infectan al hombre.

Aunque estas enfermedades no suelen ser mortales, impiden llevar una vida normal y merman la capacidad para trabajar.

De los 200 millones de personas en el mundo infectadas por el gusano que causa la esquistosomiasis, unos 20 millones son víctimas de graves consecuencias; la enfermedad todavía se encuentra en 74 países.

Los estudios muestran que la enfermedad ha disminuido 77% en las zonas en las que se ha suministrado agua de mejor calidad y acceso a la sanidad.

88 millones de menores de 15 años se infectan cada año con la esquistosomiasis.

80% de las transmisiones tienen lugar en África sub-sahariana (Egocheaga, 2004)

**Enfermedades de origen vectorial relacionadas con el agua.** Son transmitidas por vectores como los mosquitos y la mosca Tse-Tsé, que se crían y viven cerca del agua, contaminada o no.

Millones de personas padecen infecciones transmitidas por estos vectores que infectan al hombre con malaria, fiebre amarilla, dengue, enfermedad del sueño y filariasis. La malaria, la enfermedad más extendida, es endémica en 100 países en desarrollo y supone un riesgo para unos 2.000 millones de personas. Sólo en África sub-sahariana se estima que

el costo anual de la malaria es de 1.700 millones de dólares americanos en tratamientos y pérdida de productividad.

La incidencia de estas enfermedades parece estar aumentando debido a que la gente desarrolla resistencia a los medicamentos; los mosquitos están desarrollando resistencia al DDT, que es el insecticida de mayor uso; los cambios ambientales están creando nuevos lugares de cría de vectores; la migración, el cambio climático y la creación de nuevos hábitats condicionan que menos personas desarrollen inmunidad natural.

Más de un millón de personas muere de malaria cada año.

Cerca de 90% de la tasa anual de muertes por malaria tienen lugar en África subsahariana.

La malaria causa por lo menos 300 millones de casos de enfermedad aguda cada año. La enfermedad retrasa el crecimiento económico de los países africanos en 1,3% al año. Dormir bajo mosquiteras sería una manera simple y eficaz de prevenir muchos casos de malaria, sobre todo en menores de cinco años.

**Enfermedades vinculadas a la escasez de agua.** Incluyen el tracoma y la tuberculosis. Se propagan en condiciones de escasez de agua dulce y sanidad deficiente. Para abastecer a los 5.000 millones más de habitantes que se estima vivirán en el planeta en el año 2050, hará falta ofrecer sistemas de alcantarillado para 383.000 nuevos consumidores diarios (Egocheaga, 2004).

Estas enfermedades avanzan sin parar a través del mundo, pero pueden controlarse fácilmente con una mejor higiene, para lo cual es imprescindible disponer de suministros adecuados de agua potable y sistemas de saneamiento para recolectar, tratar y disponer las aguas residuales.

### **2.4.3 Organismos indicadores de la contaminación biológica del agua**

Debido a que generalmente la concentración de patógenos de las aguas naturales es minúscula, constituye una medida práctica la incorporación de su determinación

cuantitativa directa dentro del análisis rutinario de las aguas. Excepto en circunstancias muy anormales, los análisis deberán quedar satisfechos con la evidencia indirecta de la presencia de patógenos a través de la determinación de los que reciben el nombre de organismos indicadores. Entre los organismos candidatos, el grupo de bacterias coliformes, que tienen su hábitat primario en el conducto intestinal de los seres humanos, han sido durante mucho tiempo el indicador preferido de la contaminación fecal del agua y de la posible presencia consecuente de los parásitos intestinales o de los patógenos.

Para servir adecuadamente a sus propósitos, los organismos indicadores deben satisfacer las siguientes condiciones.

1.- Deben ser medidas confiables de la presencia de los organismos contaminantes tanto en las aguas naturales como tratadas, y reaccionar respecto al medio acuático natural y a los procesos de tratamiento, incluyendo la desinfección, en una forma y grado substancialmente similares a los de los patógenos pertinentes.

2.- Deben ser identificables mediante procedimientos analíticos relativamente simples que proporcionen la información deseada en forma rápida y económica.

3.- Deben encontrarse presentes en un número mucho mayor que los patógenos, si es que van a constituir medidas sensibles de la posible presencia de los patógenos.

4.- Deben presentarse a la evaluación numérica y a la distinción cuantitativa. Aun cuando las bacterias son organismos contaminantes indicadores a elección, existen muchos organismos acuáticos que por su situación solitaria o comunal pueden expresar mucho respecto a la naturaleza del ambiente en que se presentan (Maskew y col., 1987).

#### **2.4.4 Clasificación del tipo de riesgo contra el número de coliformes fecales.**

El riesgo en relación con los diferentes niveles de contaminación con coliformes fecales debe evaluarse considerando las circunstancias locales. El riesgo relacionado con una contaminación específica se incrementa con el número de personas servidas por un mismo sistema de abastecimiento de agua; por lo tanto, al incrementarse el tamaño del sistema de abastecimiento de agua, los criterios de calidad se hacen más estrictos (es decir,

las normas de calidad para ciudades son más exigentes que para las pequeñas comunidades). Sin embargo, SODIS es un método de desinfección usado a nivel del abastecimiento de una sola familia; razón por la cual, los criterios para este sistema aplicado en el punto de consumo no tienen que ser demasiado estrictos. La Guía de la OMS, Vol. 1, clasifica la presencia de 1-10 coliformes fecales o *Escherichia coli* en 100 mL de agua como bajo riesgo y una concentración de 10-100 /100 mL como riesgo intermedio, de 100-1000 coliformes/100 mL un alto riesgo, mayores de 1000 como muy alto riesgo.

#### **2.4.5 Estudios de la calidad del agua en México.**

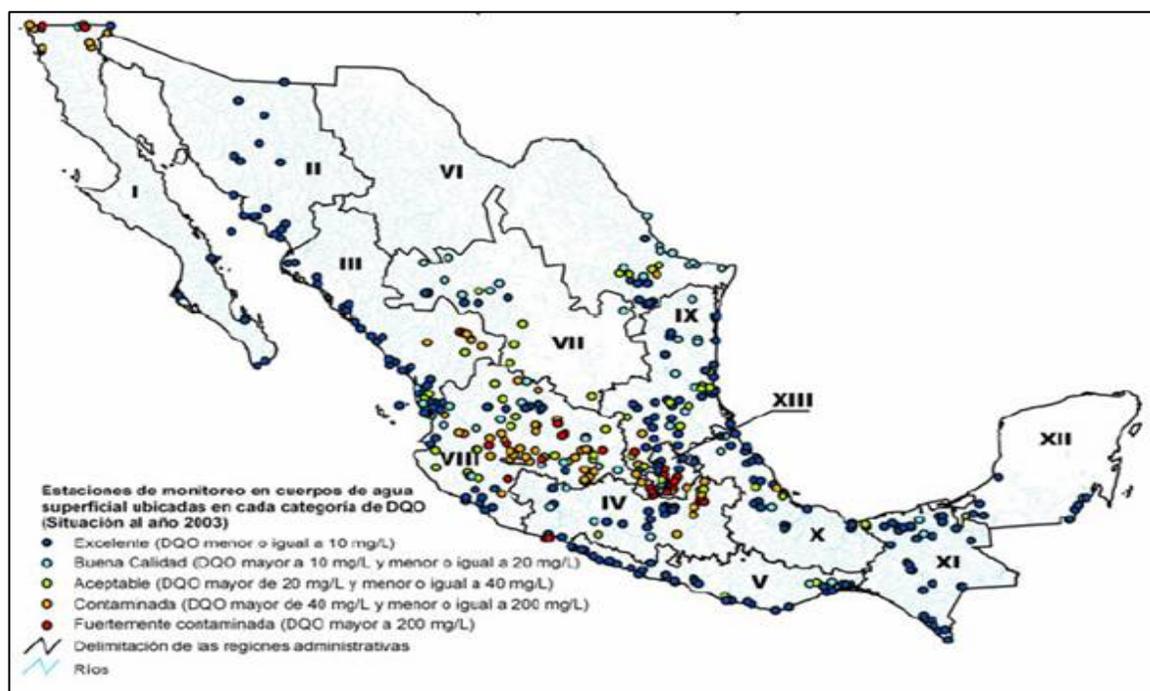
De acuerdo con el estudio realizado por el programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, el indicador de calidad del agua para México lo ubica en el lugar 106 de un total de 122 países evaluados. La República Dominicana (76), Honduras (89) y México (106) son los países latinos peor situados en la clasificación por calidad de agua, liderada por Finlandia, Canadá y Nueva Zelanda, siendo los más alejados del pelotón la India, Marruecos y Bélgica. Entre los criterios utilizados para elaborar esta lista figuran la calidad del agua en superficie, las instalaciones de tratamiento de aguas residuales y aspectos jurídicos como la existencia de regulaciones contra la contaminación. (CNA, 2004; PNUMA, 2003).

A continuación se presentan estudios de investigación sobre la calidad del agua en algunos estados de nuestro país.

En Campeche se realizó un estudio sobre la calidad sanitaria de los suministros de agua para consumo humano, consistente en la detección de bacterias mesofílicas aerobias, organismos coliformes totales y fecales, así como en la inspección del entorno inmediato. Durante el periodo comprendido de enero a junio de 1993 se efectuaron tres muestreos, el 80 y 60 por ciento de los suministros examinados presentaron niveles inaceptables de bacterias mesofílicas aerobias y de organismos coliformes, respectivamente, evidenciándose la existencia de factores potenciales de contaminación en su entorno

inmediato. Los resultados demuestran la necesidad de instrumentar un programa permanente de monitoreo de la calidad sanitaria del agua para consumo humano en la ciudad de Campeche, que asegure una vigilancia sistemática de las fuentes de abastecimiento y distribución (Isaac y col., 1994).

En Mérida, Yucatán, (México) se determinó la calidad microbiológica del agua potable, se analizaron 383 pares de muestras (dos por domicilio). De éstas, 364 (95%) muestras de las llaves exteriores y 283 (73.89%) de las interiores cumplieron las normas microbiológicas. La calidad del agua distribuida es aceptable, excepto en la zona de influencia de la planta Mérida III, en donde se encontró contaminación con mesofílicos aerobios en 21.7% de las muestras. El agua intradomiciliaria mantiene la calidad y solamente en la zona de influencia de la planta Mérida I se observó contaminación de probable origen fecal en 4.8% de las muestras (Abuxapqui y col., 1995).



**Figura 2.9.** Estaciones de monitoreo en cuerpos de agua superficial, ubicadas en cada categoría de DQO (Situación al año 2003).

Es importante destacar que con base en la figura 2.9, la calidad del agua de varios cuerpos superficiales de México, ya se encuentran contaminados por lo que se requiere

tener ampliar y mejorar los sistemas de desinfección, y la investigación realizada contribuirá enormemente en este problema.

Calidad bacteriológica del agua para consumo humano en zonas de alta marginación en Chiapas. El objetivo fue Analizar la calidad bacteriológica del agua (CBA) para consumo humano y su relación con diarreas y enteroparasitosis en niños de 1 a 14 años en comunidades de alta marginación socioeconómica de Chiapas, México. Como resultado se determinó que sólo 31% de las muestras de agua fueron aptas para consumo humano. La CBA y la presencia de diarreas referida por las madres de los menores no mostraron asociación. Los niños con mala CBA en sus viviendas mostraron mayor prevalencia de *Entamoeba histolytica* y mayor tendencia a estar parasitados. Como conclusión fue necesario desarrollar medidas que mejoren la CBA y campañas de educación que incrementen el uso de agua hervida, su manejo adecuado y el cuidado de las fuentes de abastecimiento comunitarias. (Sánchez y col., 2000).

## **2.5 MARCO LEGAL EN EL CUIDADO DE LA CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

La vigilancia y el control de la calidad microbiológica del agua para consumo humano deben ser actividades rutinarias y de primordial importancia. Se reconoce que los mayores riesgos de enfermedades causadas por microorganismos patógenos están relacionados con la ingestión de agua contaminada con heces humanas o de animales. Sin embargo, esos riesgos no pueden eliminarse por completo porque esas enfermedades también pueden difundirse por contacto personal, aerosoles y alimentos. La importancia de la vigilancia y el control de la calidad del agua para consumo humano es que la inocuidad del agua abastecida reducirá la posibilidad de difusión de las enfermedades por las vías antes indicadas, al facilitar prácticas de higiene personal y doméstica (Rojas, 2002).

El riesgo que representa a la salud la presencia de sustancias químicas es distinto al que suponen los contaminantes microbiológicos porque, por lo general, estos últimos tienen efectos más agudos. De otra parte, son pocas las sustancias químicas que, en las

concentraciones que normalmente pueden detectarse en el agua contaminada, causan problemas a la salud con efectos inmediatos, ya que normalmente éstos se manifiestan tras largos períodos de exposición, por lo que las sustancias químicas que revisten especial importancia están representados por los contaminantes acumulativos. Por eso se afirma que la vigilancia y el control de los contaminantes químicos tienen importancia secundaria cuando el agua está contaminada por microorganismos (Rojas, 2002).

El empleo de desinfectantes químicos es de gran importancia en lo que respecta a la conservación de la calidad microbiológica del agua. No obstante, pueden formar productos químicos secundarios peligrosos para la salud, pero el riesgo es extremadamente pequeño en comparación con los que supone una desinfección inadecuada o deficiente.

### **2.5.1 Vigilancia sanitaria de la calidad del agua para consumo humano**

La vigilancia sanitaria puede definirse como “el conjunto de acciones adoptadas por la autoridad competente para evaluar el riesgo que representa a la salud pública la calidad del agua suministrada por los sistemas públicos y privados de abastecimiento de agua, así como para valorar el grado de cumplimiento de la legislación vinculada con la calidad del agua” (Rojas, 2002).

En teoría, la vigilancia sanitaria tiene dos grandes componentes: (a) la correlación de la calidad física, química y microbiológica del agua con las enfermedades de origen hídrico a fin de determinar el impacto en la salud; y (b) el examen permanente y sistemático de la información sobre calidad del agua para confirmar que la fuente, el tratamiento y la distribución respondan a objetivos y reglamentación establecidos. De ese modo, el examen permanente del sistema de abastecimiento conformado por la inspección sanitaria y la evaluación de la calidad del agua destinada al consumo humano, así como el análisis del perfil epidemiológico de la comunidad sirven al órgano responsable por la vigilancia sanitaria como instrumentos de evaluación del riesgo. De lo anterior se deduce que la vigilancia sanitaria es una actividad de investigación realizada generalmente por la autoridad competente de salud pública, dirigida a identificar y evaluar los factores de riesgo

asociados a los sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano que puedan significar un peligro para la salud de la población. También es una actividad tanto preventiva como correctiva para asegurar la confiabilidad y seguridad del agua para consumo humano. La vigilancia es preventiva porque permite detectar oportunamente los factores de riesgo de modo que puedan tomarse acciones antes que se produzcan anomalías en la calidad del agua o efectos sobre la salud. Es correctiva porque permite identificar los focos de brotes de enfermedades relacionados con el agua para poder actuar sobre ellos, restablecer la calidad del agua y controlar la propagación del mal. El buen uso de la información que surja de este tipo de análisis o evaluaciones permite el mejoramiento de las normas de calidad del agua destinada al consumo humano, así como de los procedimientos de operación, mantenimiento, distribución y almacenamiento, y la reglamentación vinculada con el diseño, construcción y materiales o productos químicos empleados en el tratamiento del agua.

Por otra parte, la vigilancia sanitaria se aplica tanto a los sistemas de abastecimiento de agua públicos o privados, como al agua colectada de fuentes individuales o de otros medios. Por lo tanto, la responsabilidad de la agencia encargada de la vigilancia sanitaria es la de supervisar todos los sistemas de abastecimiento y fuentes de agua potencialmente utilizables para consumo humano (Rojas, 2002).

### **2.5.2 Control de la calidad del agua para consumo humano**

El control de la calidad del agua puede definirse como “el conjunto de actividades ejercidas en forma continua por el abastecedor con el objetivo de verificar que la calidad del agua suministrada a la población cumpla con la legislación”.

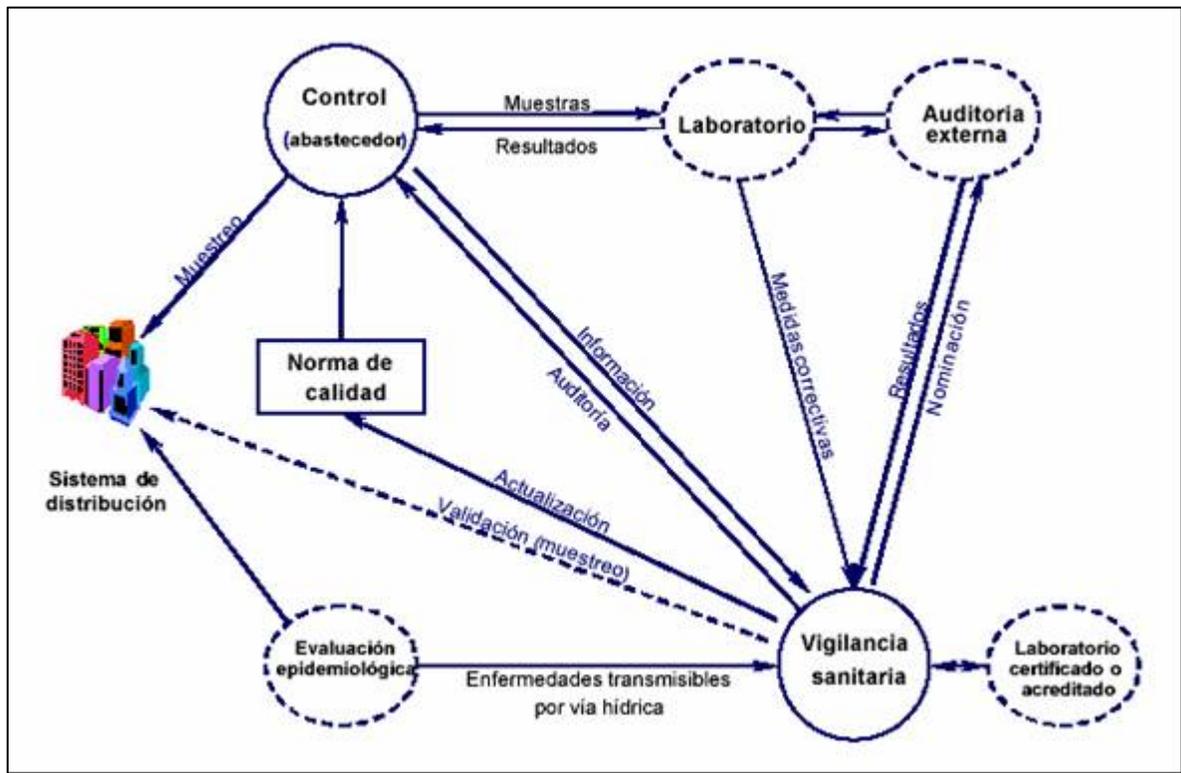
La definición de control de la calidad implica que el abastecedor de agua es responsable de la calidad del agua que produce y distribuye, y de la seguridad del sistema que opera. Ello es posible a través de una combinación de mantenimiento preventivo y de buenas prácticas operativas, apoyado por la evaluación continua de la calidad de las fuentes, de los procesos de tratamiento y del sistema de distribución, conjuntamente con las

inspecciones sanitarias, lo que asegura la buena calidad del agua y la ausencia de su recontaminación en el sistema de distribución.

Normalmente, al abastecedor público o privado se le asigna un área de suministro y su responsabilidad, desde el punto de vista de la calidad del producto entregado (agua con la calidad establecida en las normas legales), abarca desde la salida de la planta de tratamiento o de los pozos de abastecimiento de agua hasta el ingreso a la vivienda del usuario. La calidad del agua en el domicilio es responsabilidad de los habitantes de la vivienda. Por otro lado, la calidad del agua suministrada a través de camiones cisterna u otro medio que no implique la participación de abastecedores públicos o privados, y que son comunes en las áreas urbano-marginales, no suele ser responsabilidad del abastecedor de agua y por lo general las labores de control de calidad son asumidos por una institución pública o privada (Rojas, 2002).

Los servicios de abastecimiento de agua de las áreas urbano-marginales y rurales administrados por la misma comunidad, al igual que en el caso anterior, deben ser controlado por una institución pública o privada. Usualmente, el ministerio de salud encarga al organismo responsable de la vigilancia sanitaria la ejecución de esa tarea. Sin embargo, es recomendable que una dependencia ajena a la de vigilancia sanitaria ejecute el control, aunque ambas pertenezcan al mismo ministerio y utilicen el mismo laboratorio central. Esto último es recomendable a fin de no duplicar la inversión en infraestructura analítica.

En resumen, para que el programa de vigilancia sea efectivo, el ente regulador y el organismo de vigilancia debe contar con una legislación y con los mecanismos necesarios para verificar su cumplimiento, pero además es importante que el organismo establezca una relación positiva y de apoyo al abastecedor (figura 2.10). Sin desmedro de lo dicho, la existencia de una legislación anticuada o que se encuentre en proceso de actualización, no debe ser motivo para postergar o impedir la ejecución de programas de vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano (Rojas, 2002).



**Figura 2.10.** Interrelación entre el control y la vigilancia sanitaria de la calidad del agua para consumo humano.

### 2.5.3 Marco político institucional y responsabilidades

La efectividad de los programas de vigilancia sanitaria, vigilancia operacional y control de la calidad del agua para consumo humano depende de una legislación que responda a situaciones nacionales, jurisdiccionales y constitucionales, entre otras. El marco legal abarca tres áreas vinculadas entre sí: la política, la legislativa y la normativa.

La intervención política es fundamental para facilitar la revisión, modificación, preparación y adopción de leyes y reglamentos que hagan posible el desarrollo de los programas de vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano. La intervención legislativa proporciona el marco legal que deberá ser del más alto nivel y estar constituido por las leyes, decretos y resoluciones correspondientes.

Conceptualmente, la legislación debe identificar a la institución responsable de la vigilancia y conferirle la responsabilidad de la observancia del cumplimiento de los reglamentos y normas relacionados con la conservación y preservación de la calidad del agua de consumo humano, con especial énfasis en la evaluación de la inocuidad del agua y de la infraestructura sanitaria a través del estudio de los resultados de las pruebas analíticas, inspecciones sanitarias y auditorías puntuales, así como la verificación de la veracidad de la información provista por el abastecedor. Además, se le debe conferir autoridad para obligar al abastecedor a tomar las medidas correctivas necesarias en caso de emergencias, en especial cuando se haya detectado contaminación microbiana.

Igualmente, la legislación debe definir la responsabilidad de los órganos de vigilancia y de control en cuanto a la evaluación y seguimiento de la calidad del agua en las fuentes de abastecimiento, en el proceso de producción y en la red de distribución; precisar las sanciones por infracciones momentáneas o continuas; y definir al responsable de establecer la norma de calidad del agua para consumo humano. Adicionalmente, la legislación debe tener en cuenta que la vigilancia sanitaria y operacional es primordialmente una función de apoyo y asesoramiento y solo en segundo lugar una función de penalización por el incumplimiento de las normas.

En el caso del abastecedor, se debe precisar sus atribuciones, funciones, derechos y obligaciones jurídicas y destacar que tiene el deber legal de proporcionar agua de acuerdo con las normas establecidas, así como la supervisión, inspección, operación y mantenimiento del sistema de abastecimiento de agua. Asimismo, se debe considerar que el abastecedor puede emprender acciones legales contra terceros para proteger sus fuentes de agua y su sistema de distribución de toda fuente de contaminación extraña (Rojas, 2002).

En relación con la normatividad, las acciones de las autoridades responsables y de las instituciones involucradas en la vigilancia y el control de la calidad del agua deben estar respaldadas por reglamentos, normas o códigos de fiscalización que especifiquen la calidad del agua a ser suministrada, los procesos de tratamiento aceptables, las adecuadas prácticas de tratamiento y distribución, los criterios de diseño y construcción, los tipos de materiales

de construcción, la calidad de los productos químicos del tratamiento del agua y los cuidados para la distribución del agua, entre otras consideraciones.

Los reglamentos, normas o códigos deben basarse en la relación entre riesgo y beneficio a la salud a fin de adoptar procedimientos acordes con la realidad de los países. De esa manera, esos procedimientos tendrán en cuenta las prioridades nacionales y los factores sanitarios, económicos, humanos e institucionales.

La facultad para promulgar y revisar las normas sobre calidad del agua, los códigos de prácticas y otros tipos de reglamentos técnicos relacionados con la protección de la salud humana, debe recaer en el sector competente, generalmente representado por el ministerio de salud (Rojas, 2002).

En muchos países, la agencia responsable de la vigilancia es el ministerio de salud y sus oficinas regionales o departamentales. En otros países es la agencia de protección ambiental o los departamentos de salud ambiental de los gobiernos locales. Preferentemente, la agencia de vigilancia debería ser una institución nacional designada por la ley y operar en el nivel central y descentralizado para atender en forma eficiente al nivel local o distrital. La oficina encargada de la vigilancia sanitaria debe ser la única responsable de desarrollar tal acción con el objetivo de proteger a las personas de las enfermedades transmitidas por el agua y de otros peligros asociados con los sistemas de abastecimiento de agua (Rojas, 2002).

En México las instituciones responsables de verificar y proporcionar agua potable cumpliendo la normatividad mexicana son: La Comisión Nacional del Agua, la Comisión estatal del Agua y la Secretaría de Salud.

## **2.6 PROCESOS DE DESINFECCIÓN DEL AGUA.**

La desinfección del agua se refiere a la destrucción de organismos causantes de enfermedades o patógenos presentes en ella, no todos los organismos se destruyen durante el proceso, punto en el que radica la principal diferencia entre desinfección y esterilización

(Arboleda, 2000; Metcalf y Eddy, 1996). El principal propósito de la desinfección del agua es impedir la diseminación de enfermedades hídricas. A partir de 1854 se demostró la importancia del agua como vehículo de algunas enfermedades, con los estudios elaborados por Snow y Cork sobre las causas de una epidemia de cólera en Londres, se pudo demostrar que la fuente de infección había sido el agua (Romero, 2000).

Los procesos de desinfección se dividen en físicos y químicos, los físicos más importantes son el calor (uso de combustible), los rayos ultravioleta (uso de lámpara), SODIS (Es una combinación de calor y rayos ultravioleta, radiaciones solares) y dentro de los químicos están los halógenos (Cloro, bromo y yodo), plata coloidal y el ozono (Maskew y col., 1987). Las tecnologías más convencionales son la ozonación, cloración, Radiación UV artificial., estas tecnologías requieren equipo sofisticado, demandan operadores expertos y capital. Otros medios para la desinfección a nivel domestico, tal como la ebullición del agua o el uso de compuestos de cloro (en tabletas hipoclorito de calcio o en solución hipoclorito de sodio), son ambientalmente poco firmes. La ebullición requiere de 1 kg de madera/l de agua, y el mal uso del hipoclorito de sodio posee un riesgo en la seguridad (Laurie y col., 2003).

A continuación se explicaran estos procesos de desinfección.

### **2.6.1 Desinfección por calor artificial**

Al elevar la temperatura del agua a su punto de ebullición le proporcionará la desinfección. Debido a que ninguna de las enfermedades hídricas peligrosas es causada por bacterias formadoras de esporas u otros organismos resistentes al calor (Maskew y col., 1987). Este proceso es más aplicable para desinfección domestica (15 a 20 minutos de ebullición) y no para plantas de purificación. El agua adquiere un sabor peculiar debido a la expulsión de gases por el incremento de temperatura (Arboleda, 2000).

### 2.6.2 Desinfección por rayos Ultravioleta (UV) artificial.

El proceso consiste en hacer pasar una lámina de agua delgada bajo una fuente de rayos UV. La turbiedad es un factor importante en la eficiencia de la desinfección ya que interviene en la penetración de los rayos (Arboleda, 2000). La fuente puede ser una lámpara de vapor de mercurio y cuarzo (Romero, 2000), donde los rayos penetran la pared celular de los organismos y absorbida por los materiales celulares, incluidos el ADN y el ARN, lo cual puede impedir la reproducción o producir directamente la muerte de la célula (Metcalf y Eddy, 1996).

La luz UV es radiada por tubos de cuarzo que contienen vapor de mercurio (emisor). Cuando se induce una corriente eléctrica en los polos, se genera un arco voltaico que ioniza a los átomos de este metal (Hg), (figura 2.11) en donde los electrones incrementan su energía hasta que son convertidos en fotones de luz UV. (Díaz, 2002).

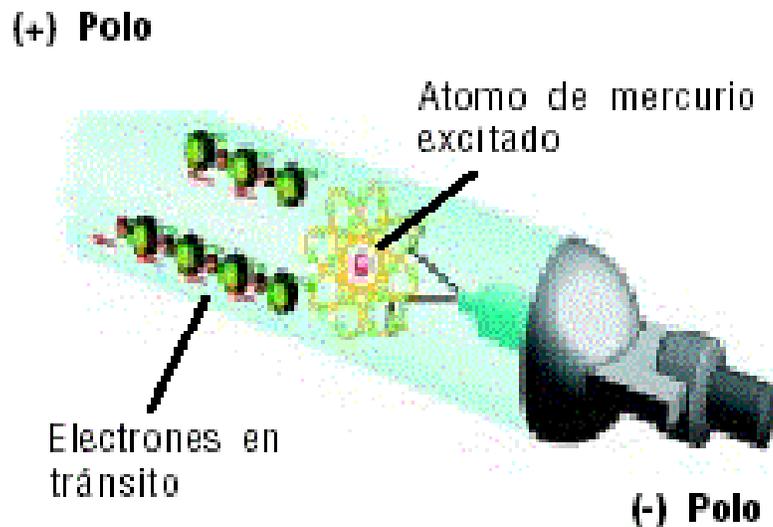
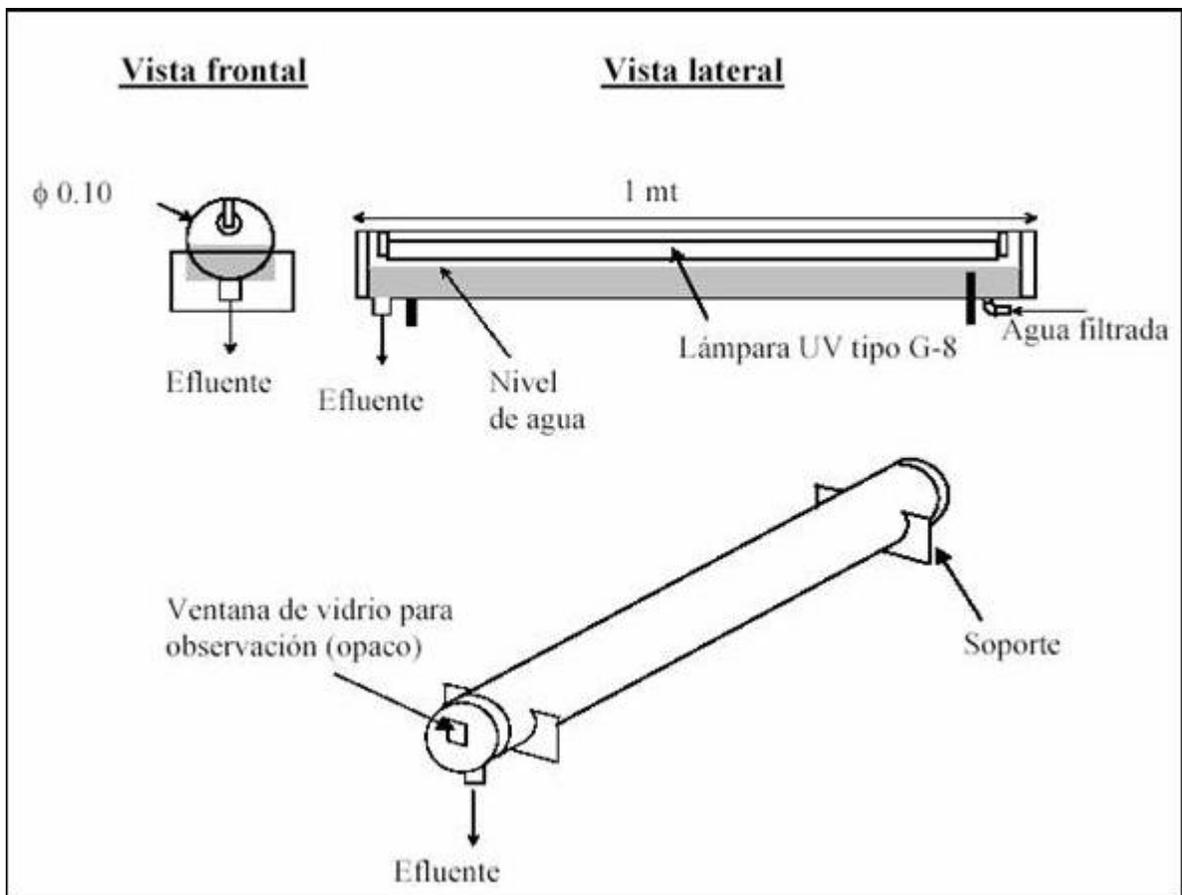


Figura 2.11. Lámpara de luz ultravioleta.

La luz ultravioleta constituye una parte del espectro electromagnético, con longitudes de onda entre 100 y 400 nanómetros (nm). Cuanto menor la longitud de onda, mayor la energía producida. Las lámparas más usadas son de baja presión de vapor de mercurio tienen una longitud de onda de 253.7 nm.

La luz ultravioleta, conocida generalmente como UV (Luz ultravioleta), es emitida en tres diferentes bandas UV-A, UV-B y UV-C. En esta última se encuentra la mayor acción germicida, lo cual corresponde a una longitud de onda entre 200 y 300 nanómetros. La longitud de onda con mayor acción germicida es de 254 nanómetros (Pérez, 2002).



**Figura 2.12.** Instalación típica de un equipo de radicación UV con lámpara fuera del agua.

De modo que la longitud de onda a 254 nm generada por emisores monocromáticos (presión baja) proporcionan la máxima efectividad germicida, inactivando

los cinco principales grupos de microorganismos -virus, bacterias, hongos, algas, y protozoos- es decir, cuando estos organismos se exponen a la radiación UV, ésta penetra la pared celular llegando hasta el núcleo donde se encuentra la información genética, destruyendo la cadena de ADN y por lo tanto impide su reproducción (Díaz, 2002).

He aquí la importancia de verificar el equipo de luz ultravioleta que se tenga. Se requiere una dosis de luz ultravioleta entre 6 y 10 mJ/cm<sup>2</sup>. Esta dosis se encuentra totalmente dentro de los límites de los sistemas de purificación que ofrezcan cuando menos 16,000 microwatts por segundo por centímetro cuadrado (mWs/cm<sup>2</sup>)\*—1,000 mWs/cm<sup>2</sup> = 1 microwatt por segundo por centímetro cuadrado (μWs/cm<sup>2</sup>) = 1 mJ/cm<sup>2</sup> (Pérez y col., 2002).

Los sistemas UV no contienen partes mecánicas que se desgasten o requieran mantenimiento (Figura 2.12). La lámpara germicida UV, dependiendo del modelo, tiene una vida útil de aproximadamente 7,500 a 10,000 horas, lo que significa que se tienen que cambiar cada 10 a 12 meses de operación. Aunque la lámpara puede estar encendida por más de un año, lo más probable es que la acción germicida ya no sea la recomendada, y no es suficiente para mantener el nivel de purificación adecuado. Es importante además revisar el tubo de cuarzo periódicamente y mantenerlo limpio (Pérez y col., 2002). Con base en lo anterior es recomendable verificar la lámpara de luz ultravioleta al menos una vez cada mes para ver si el tubo de cuarzo se encuentra limpio y si la lámpara de luz ultravioleta se esta en buenas condiciones. En caso de que el tubo de cuarzo este sucio limpiar con una solución antisarro y si la lámpara presenta manchas plateadas es momento de pensar en cambiarla.

Para que el sistema UV opere de forma eficiente se recomienda que el agua de entrada esté libre de partículas en suspensión o disolución. En otras palabras, el equipo purificador UV no debe operar solo, a menos que la calidad del agua lo permita, por estar dentro de los siguientes niveles (Pérez y col., 2002):

- Menos de 5 NTU de turbidez
- Menos de 0.3 partes por millón (ppm) de hierro
- Menos de 0.05 ppm de ácido sulfhídrico
- Menos de 10 ppm de sólidos suspendidos

- Menos de 0.05 ppm de manganeso
- Dureza menor a 120 ppm
- pH entre 6.5 a 9.5
- Color: ninguno

Finalmente de acuerdo a lo anterior, es recomendable hacer un análisis del agua purificada periódicamente para verificar que el equipo que se esta usando se encuentra en buenas condiciones.

***Cálculo de dosis de luz ultravioleta:***

Al cálculo que relaciona la intensidad de energía aplicada durante cierto tiempo de exposición se le ha denominado dosis. La sensibilidad de los microorganismos a la radiación UV varía, ya que algunos tienen mayor resistencia y no se destruyen en la misma proporción. No obstante, teniendo en claro el microorganismo que se desea inactivar, es posible establecer la dosis adecuada. La dosis UV es directamente proporcional a la intensidad del emisor, multiplicado por el tiempo que un microorganismo está en contacto con la radiación dentro de la cámara de contacto.

$$D = \frac{(I) (t_{exp})}{A_{rad}} = \frac{(mW) (seg)}{cm^2}$$

**Donde:**

**D:** Dosis, expresada en segundos miliWatt por centímetro cuadrado mWseg/cm<sup>2</sup>

**I:** Intensidad UV, expresada en miliWatts (mW)

**t<sub>exp</sub>:** tiempo de exposición expresado en segundos

**A<sub>rad</sub>:** Área de irradiación, expresada en centímetros cuadrados (cm<sup>2</sup>)

Comúnmente los valores de dosis varían dependiendo su aplicación, por ejemplo, las autoridades sanitarias en Estados Unidos, fijaron el valor de dosis mínimo para consumo humano doméstico en 16 mWseg/cm<sup>2</sup>, en nuestros días se emplea una dosis estándar para la industria embotelladora alrededor de 30 mWseg/cm<sup>2</sup>, aunque está previsto normalizar la dosis mínima en 50 mWseg/cm<sup>2</sup> (Díaz, 2002). Por favor verificar que el equipo de luz ultravioleta que se tenga proporcione estas características de dosis.

Además es muy importante verificar que el tubo de vidrio no se encuentre con sarro, en caso de que esto suceda, es recomendable que se limpie con una solución que permita disolver este tipo de compuestos, por favor no rallar y tallar con ningún tipo de material para su limpieza.

### **2.6.3 Desinfección con Cloro**

En todo el mundo, el mecanismo de desinfección más aplicado en los sistemas de abastecimiento de agua es el que emplea el cloro y sus compuestos derivados como agentes desinfectantes. Fue introducido masivamente a principios del siglo XX y constituyó una revolución tecnológica, que complementó el proceso de filtración que ya era conocido y utilizado para el tratamiento del agua. La cloración, tal como se ha expresado en el capítulo anterior, incrementó en 50% la esperanza de vida de los países desarrollados (Solsona y Méndez, 2002).

La clave de su éxito es su accesibilidad en casi todos los países del mundo, su razonable costo, su alta capacidad oxidante, que es el mecanismo de destrucción de la materia orgánica, y su efecto residual. Todo ello permite en forma bastante simple, asegurar la inocuidad del agua desde que se produce hasta el momento que se usa, lo que resulta muy beneficioso, tanto en sistemas pequeños como en grandes ciudades con redes de distribución extendidas (Solsona y Méndez, 2002).

Aunque el cloro y sus derivados no son los desinfectantes perfectos, muestran las siguientes características que los hacen sumamente valiosos:

- 1.** Tienen una acción germicida de espectro amplio.
- 2.** Muestran una buena persistencia en los sistemas de distribución de agua, pues presentan propiedades residuales que pueden medirse fácilmente y vigilarse en las redes después que el agua ha sido tratada o entregada a los usuarios.
- 3.** El equipo para la dosificación es sencillo, confiable y de bajo costo. Además, para las pequeñas comunidades hay dosificadores de “tecnología apropiada” que son fáciles de usar por los operadores locales.

4. El cloro y sus derivados se consiguen fácilmente, aun en lugares remotos de los países en desarrollo.

5. Es económico y eficaz en relación con sus costos.

Los productos de la familia del cloro disponibles en el mercado para realizar la desinfección del agua son (Solsona y Méndez, 2002):

- Cloro gaseoso
- Cal clorada
- Hipoclorito de sodio
- Hipoclorito de calcio.

El cloro es un poderoso oxidante, descubierto por Scheele en 1774 y empleado por primera vez en América como desinfectante del agua en 1908 por Jonson y leal en Nueva Jersey. La floración puede realizarse con cloro gas o utilizando algunas sales como hipoclorito de sodio y el hipoclorito de calcio (sólido o en suspensión), el cloro se emplea principalmente en plantas medianas y grandes.

Las ventajas de este proceso son facilidad de aplicar y eficiente, pero, sus desventajas son que es corrosivo y en algunos casos formar subproductos posiblemente peligrosos para la salud, así como producir sabor desagradable en el agua.

Las reacciones del cloro en el agua son hidrólisis, que es la producción de ácido hipocloroso e ion hipoclorito, y las de oxido-reducción donde el cloro se combina con el nitrógeno amoniacal para producir cloraminas, triclororuro de nitrógeno, También reacciona con aminoácidos, materiales proteínicos y orgánicos, produciendo subproductos de la cloración (SPC) tales como trihalometanos (THMs), los mas comunes en el agua son el cloroformo, bromoformo, bromodiclorometano, dibromoclorometano (Arboleda, 2000).

Estudios Epidemiológicos han sugerido un posible eslabón entre la cloración y los SPC con el exceso de riesgo en cáncer de recto y de vejiga. La investigación de SPC a recibido mucha atención, por que se demostró que el cloroformo es un carcinógeno animal (Karen y Keith, 1997).

#### **2.6.4 Desinfección con Bromo**

El bromo tiene características químicas y desinfectantes similares al cloro. Su desventaja ante el cloro es que es más costoso y comercialmente escaso. Por estar involucrado en la formación de hidrocarburos halogenados y por la falta de experiencia en su uso, es poco factible el su uso como desinfectante (Romero, 2000).

Siendo de la familia de los halógenos, el bromo es muy parecido y actúa también en forma semejante al cloro: una vez disuelto en el agua produce ácido hipobromoso (HOBr) un primo hermano del ácido hipocloroso (HOCl). El poder de desinfección del HOBr es muy alto, aunque ligeramente menor que el del hipocloroso (Solsona y Méndez, 2002).

La ventaja del uso del bromo es que a temperatura ambiente es líquido, lo que lo hace más simple de manipular y dosificar que el cloro. Hay que destacar, sin embargo, que la sustancia como tal es corrosiva y agresiva, por lo su manejo también requiere mucho cuidado. Además, la disponibilidad del bromo en cualquier país o ciudad no se compara con la fácil adquisición del cloro.

##### ***Efectos del bromo sobre la salud y producción de SPD***

El bromo se vaporiza con mucha facilidad y los gases son muy agresivos, por lo que se debe evitar su inhalación. Hay que destacar que al igual que el cloro, tanto éste como el bromo no parecen indicar ningún potencial cancerígeno cuando se disuelven en el agua. El agua clorada y el agua bromada no son cancerígenas. Pero el bromo al igual que el cloro, forma trihalometanos y si hay presencia de ácidos fúlvicos y de amoníaco en el agua cruda, entonces formará bromoformo. Este es el riesgo, pues estos compuestos sí son cancerígenos y al igual que muchos otros SPD son motivo de preocupación (Solsona y Méndez, 2002).

##### ***Acción desinfectante del bromo***

Como se ha mencionado, el HOBr actúa de manera similar al HOCl; esto es, penetrando las membranas de las células de los microorganismos. Una vez dentro de la

célula, su sola presencia parece “desorganizar” la estructura de aquellos pero atacan también reaccionando con grupos sulfhídricos, inactivando enzimas y deteniendo el proceso metabólico, lo que lleva a la muerte del microorganismo.

### ***Equipos***

Al ser líquido, el bromo se dosifica por medio de una bomba de diafragma o pistón y sus requerimientos operativos como las medidas de seguridad son semejantes a las usadas y descritas para el cloro.

### ***Monitoreo***

No existe una prueba específica para el bromo. En análisis de rutina y aunque el método está sujeto a interferencias, se utiliza el método de la orto-tolidina, tal como se emplea en la determinación de cloro (Solsona y Méndez, 2002).

### ***Costos***

Como se ha indicado, el bromo actúa en el agua de forma similar al cloro y podría haber sido tan popular como este último si no fuera por las diferencias de costo. A igualdad de equipos dosificadores, se estima que la bromación es cinco veces más cara que la cloración y a eso hay que sumarle la difícil disponibilidad del bromo.

### ***Ventajas y desventajas de la desinfección con bromo***

La desinfección con bromo presenta casi todas las ventajas de la cloración, pero tiene dos grandes desventajas frente a éste: su costo mucho más elevado y la dificultad para adquirirlo en cualquier comunidad, sobre todo en aquellas alejadas y menores de los países en desarrollo (Solsona y Méndez, 2002).

## **2.6.5 Desinfección con Plata coloidal**

La mayoría de los metales presenta la propiedad llamada “oligodinamia” que significa “efecto o poder en pequeña cantidad”. Metales como la plata, el cobre, el mercurio, el manganeso y el hierro, entre otros, son potenciales desinfectantes del agua. Sin embargo, de todos ellos y por variadas razones, solo la plata ha tenido algún uso en la desinfección del agua para consumo humano y como tal ha sido utilizada desde la antigüedad (Solsona y Méndez, 2002).

La plata coloidal fue usada por los romanos para preservar el agua en jarras de almacenamiento, ya que en concentraciones de 25- 40  $\mu\text{g/L}$  es un buen desinfectante (Romero, 2000). Es utilizado en países europeos especialmente en plantas de purificación para usos industriales, el sistema conocido como Katadyn si bien es más caro que la cloración, deja efectos residuales. La plata coloidal es utilizada en filtros domésticos de porcelana porosa con relativo éxito (Arboleda, 2000).

### ***Efectos de la plata sobre la salud y producción de SPD***

La plata no es particularmente tóxica para los seres humanos y al ser ingerida, el cuerpo absorbe solo fracciones muy pequeñas de ella. En ciertos tratamientos médicos que usan dosis altas del metal se ha detectado descoloramiento de la piel, pelo y uñas (argiriosis), pero en las concentraciones que se utilizan para desinfectar el agua, no se ha observado ese inconveniente. La OMS no ha propuesto un valor guía para la plata en el agua de bebida, precisamente por esa relativa seguridad que manifiesta. En el tratamiento con plata no se producen sabores, olores ni colores anormales en el agua. Tampoco hay formación de SPD.

### ***Acción desinfectante de la plata***

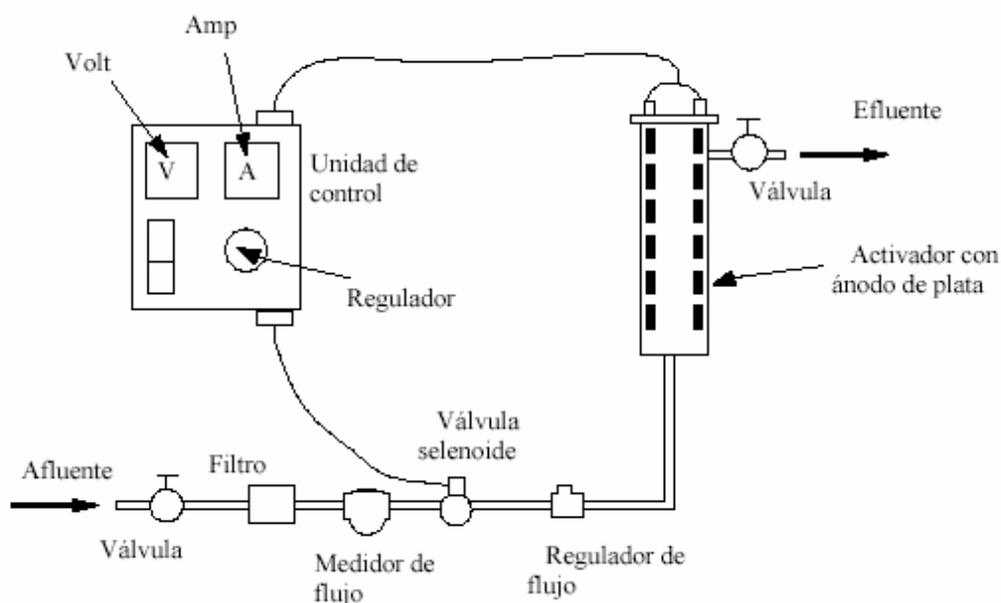
La plata solo tiene propiedades desinfectantes en su estado coloidal, esto es cuando se presenta en partículas extremadamente pequeñas que permanecen en suspensión y que por su tamaño se cargan eléctricamente con mucha facilidad. En ese estado también es conocida como proteína de plata, sales de plata, proteína de plata ligera y proteína de plata fuerte. Las sales que se utilizan son: cloruro de plata y yoduro de plata.

La plata en su forma coloidal no elimina a los virus, pero se considera de gran eficacia para destruir diversas bacterias. El mecanismo de desinfección actúa por la inactivación de las enzimas de las células bacterianas y hongos que usan oxígeno para su metabolismo, pues causa una disrupción celular, aunque en tiempos muy variables y dependientes de la temperatura. Al respecto, a temperatura de 10 °C o menores se requieren tiempos muy largos, lo que hace difícil determinar el poder germicida con exactitud. La plata coloidal puede permanecer largo tiempo en el agua, pero debido a esa lentitud en las reacciones de eliminación de materia orgánica, se considera que la plata no posee un buen

poder residual. Las dosis recomendadas para una alta eficiencia germicida están en el rango de 25 a 75  $\mu\text{g/L}$  de plata (0,025 – 0,075 mg/L) (Solsona y Méndez, 2002).

### ***Equipos***

En la desinfección con plata se emplean tres métodos. El primero o “de contacto” requiere hacer pasar el agua a través de dispositivos saturados de plata, como tanques con paredes y pantallas recubiertas con pinturas especiales que la contienen. El segundo método consiste en dosificar soluciones de plata de baja concentración de la misma forma como se hace con las soluciones de cloro y empleando equipos y dosificadores similares. El tercer método, el electrolítico, parece ofrecer el procedimiento más práctico para usar la plata. Hace uso de un número de electrodos de plata conectados al polo positivo (ánodo) de una fuente eléctrica de bajo poder. Un electrodo inerte se usa como polo negativo, donde se produce y libera hidrógeno. Por electrólisis, los iones de plata son liberados por los electrodos dentro de la corriente de agua a ser tratada en proporción a la corriente suministrada. Esto es muy apropiado, pues mediante la variación de la corriente, se varía la dosificación (Solsona y Méndez, 2002).



**Figura 2.13** Equipo electrolítico de plata típico.

### ***Equipo electrolítico de plata típico.***

El método electrolítico solamente se emplea en pequeños sistemas de abastecimiento de agua. Desde el punto de vista práctico y seguro, se precisa de cierto nivel de automatización y complejidad en el sistema de control, que debe tener sensores para verificar la correcta desinfección (Figura 2.13). Esto simplemente no se puede hacer en forma manual. También es recomendable tener una conexión a una válvula solenoide que pueda cortar automáticamente el flujo de agua en cualquier momento que el sistema no pueda producir la dosificación adecuada (Solsona y Méndez, 2002).

### ***Monitoreo***

En lo que respecta al monitoreo, no hay una prueba simple para la medición del contenido de plata en el agua y la que se aplica presenta un considerable error de exactitud. El método más efectivo es la dosificación del agua con cantidades controlables de plata; es decir, el control se efectúa básicamente en la dosificación y no en el control analítico después de la misma.

### ***Costos***

El costo de la pintura no es excesivamente alto, pero este método es el menos apropiado. Para una pequeña población, la dosificación de una solución requiere los equipos ya mencionados para el cloro, en donde la gama de bombas dosificadoras de diafragma es muy variable y los costos no son abultados. El costo de las soluciones, en cambio, es más elevado y en todo caso notoriamente más alto que las soluciones equivalentes de cloro con igual capacidad bactericida.

Para los pequeños sistemas, los equipos electrolíticos presentan costos considerables que van de \$ 1.000 en más. El costo final depende del tamaño, del caudal a desinfectar y de los equipos auxiliares. En lo que respecta al costo de operación de estos últimos equipos, además del costo de la solución de plata, debe considerarse el costo de la energía eléctrica. En lo que respecta al mantenimiento, éste también es de consideración porque el reemplazo de los electrodos es relativamente frecuente, puesto que son la única fuente de iones de plata y se gastan relativamente rápido (Solsona y Méndez, 2002).

### ***Ventajas y desventajas de la desinfección con plata***

Las aparentes virtudes de la plata para el tratamiento del agua son que no produce sabor, olor ni color en el agua tratada y no hay formación de productos adicionales.

Es una metodología muy simple y fácil de manejar en las áreas rurales del mundo en desarrollo. Por ello puede ser utilizada en los planes de desinfección del agua en el nivel familiar.

Su desventaja es que resulta difícil controlar la dosificación por falta de un método simple de análisis de laboratorio. La segunda desventaja, y esta ha sido históricamente una barrera casi infranqueable, es que los costos de producción son altos. Tanto el método electrolítico donde los electrodos necesarios para producir los iones de plata se desgastan relativamente rápido, como la dosificación de plata coloidal son de alto costo. Se estima que el costo de la desinfección con plata resulta 200 a 300 veces superior al costo de la cloración (Solsona y Méndez, 2002).

### **2.6.6 Desinfección con ozono**

El ozono es conocido desde hace más de cien años. En 1840 se le dio el nombre actual “ozein”, que significa heder, oler. En 1857 se diseñó un generador y en 1906 se usó por primera vez en una planta de tratamiento de agua, en Niza, Francia (Solsona y Méndez, 2002).

El ozono fue usado por primera vez para la desinfección de aguas de abastecimiento en Francia, a principios del siglo (Metcalf y Eddy, 1996), su fórmula es  $O_3$ , es una forma alotrópica del oxígeno producida mediante el paso de oxígeno o aire seco a través de una descarga eléctrica de 5000-20000V, 50-500 Hz, con un consumo energético de 10-25 KWh/Kg de ozono. Es un gas tóxico e inestable y uno de los más potentes germicidas usados en el tratamiento de aguas. Su ventaja radica en su efectividad germicida, además remueve problemas de color, olor y sabor (Romero, 2000). El ozono también es un virucida muy efectivo y su efectividad es mayor que la del cloro (Metcalf y Eddy, 1996), su principal desventaja es que cantidades tan pequeñas como 0.5 mg/l de

manganeso y 0.1 mg/l causan problemas, pues producen precipitación y flotación de las partículas minerales oxidadas (Arboleda, 2000).

En los Estados Unidos de América antes de 1980 había menos de 10 plantas, pero el número ha ido creciendo notablemente y como se explicará, a medida que los métodos de tratamiento se vuelvan más exigentes, la demanda será mayor (Solsona y Méndez, 2002).

### ***Propiedades del ozono como desinfectante y descripción del método***

El ozono (O<sub>3</sub>) es un gas alótropo del oxígeno. A la temperatura y presión del ambiente es un gas inestable que se descompone rápidamente para volver a la molécula de oxígeno (O<sub>2</sub>). Debido a esta característica, no se puede almacenar o envasar, sino que debe generarse *in situ* y usarse inmediatamente. Por lo general, la ozonización se utiliza cuando se requiere su propiedad más importante: su elevado potencial oxidante, que permite eliminar los compuestos orgánicos que dan color, sabor u olor desagradables al agua y, al mismo tiempo, cuando se desea inactivar los microorganismos patógenos del agua. Una característica importante de la ozonización es la ausencia de efecto residual, lo cual es un beneficio porque si el ozono se mantuviese en el agua le daría un sabor desagradable, pero a la vez es una desventaja, ya que, como se ha expresado, es necesario asegurar la calidad del agua hasta que llegue al consumidor mediante algún efecto residual (Solsona y Méndez, 2002).

A pesar de sus excelentes propiedades, su uso se ha restringido a ciudades grandes con fuentes de agua muy contaminadas y se ha empleado poco en comunidades pequeñas y de porte medio. El inconveniente principal para las comunidades pequeñas ha sido el costo inicial y el de operación, así como las dificultades de operación y mantenimiento. Sin embargo, cuando las fuentes de agua accesibles están muy contaminadas (biológica y químicamente), puede ser el método más recomendable para la oxidación de las sustancias orgánicas y desinfección primaria, siempre que cuente con la adición de un sistema de cloración secundario para mantener el efecto residual durante su distribución.

La ozonización se ha ensayado y probado extensamente; sin embargo, para las comunidades con menos de 10,000 habitantes probablemente se deberá considerar inicialmente un proyecto demostrativo desde el punto de vista operativo, administrativo y de infraestructura. En la actualidad, se están comenzando a fabricar equipos de ozonización

de capacidad menor que empiezan a ser económicamente factibles, lo que permitirá su futura aplicación en comunidades pequeñas (Solsona y Méndez, 2002).

El método de desinfección por ozonización consiste en agregar cantidades suficientes de ozono lo más rápidamente que sea posible, de manera que satisfaga la demanda y mantenga un residuo de ozono durante un tiempo suficiente para asegurar la inactivación o destrucción de los microorganismos. La demanda de ozono en la mayoría de los sistemas de abastecimiento de agua suele ser mayor a la del cloro, debido a su gran potencial de oxidación. Los procesos de desinfección por ozono normalmente tratan de mantener un residual mínimo de 0,4 a 0,5 ppm después de 10 a 20 minutos de contacto con el agua (Solsona y Méndez, 2002).

#### ***Mecanismos de la desinfección con ozono***

El mecanismo de desinfección en la ozonización se basa en el alto poder del ozono como oxidante protoplasmático general. Esta condición convierte al ozono en un eficiente destructor de bacterias y la evidencia sugiere que es igual de efectivo para atacar virus, esporas y quistes resistentes de bacterias y hongos.

A diferencia del cloro, la capacidad desinfectante del ozono no depende tanto de su período de retención en el agua (aunque esto tiene un efecto), sino más bien de la dosis suministrada (en la fórmula  $C \times T$  prima entonces el valor de "C"). Esto se debe a que su alto potencial oxidante produce gran inestabilidad del ozono, incluso en el agua destilada, lo que quiere decir que quedará ozono remanente y por un corto tiempo solo cuando toda la materia con alta capacidad de oxidación haya sido oxidada. En caso contrario, es posible que no se haya satisfecho completamente la demanda de ozono. Dada su escasa permanencia, es comprensible entonces la importancia de determinar adecuadamente la demanda de ozono y la dificultad que reviste determinar el residual que asegure una desinfección completa.

Cuando hay presencia de material orgánico, la química se hace más compleja y se acelera la descomposición del ozono. Con un potencial de oxidación de 2,07 voltios, el ozono teóricamente puede oxidar la mayoría de los compuestos orgánicos y los convierte en dióxido de carbono y agua, pero como es selectivo en cuanto a las sustancias que oxida rápidamente, la cinética de las reacciones del ozono con muchos compuestos será

demasiado lenta para que resulte en la conversión de estos a dióxido de carbono durante el tratamiento del agua. Como casi siempre la demanda total de ozono excede su suministro, estas reacciones cesarán mucho antes de que todas las sustancias orgánicas se hayan oxidado totalmente. En el tratamiento de sustancias orgánicas, el ozono se ha usado principalmente para la ruptura de enlaces múltiples como tratamiento preliminar, antes de la filtración y como ayuda para la coagulación (Solsona y Méndez, 2002).

Otra consideración que se debe tener en cuenta, al igual que con otros desinfectantes, es que la eficacia del ozono depende de su contacto con los microorganismos, por lo que debe evitarse que estos se agrupen y protejan (si el agua es turbia) y también se debe proveer algún sistema de mezcla o contacto con el ozono antes que el gas se disipe.

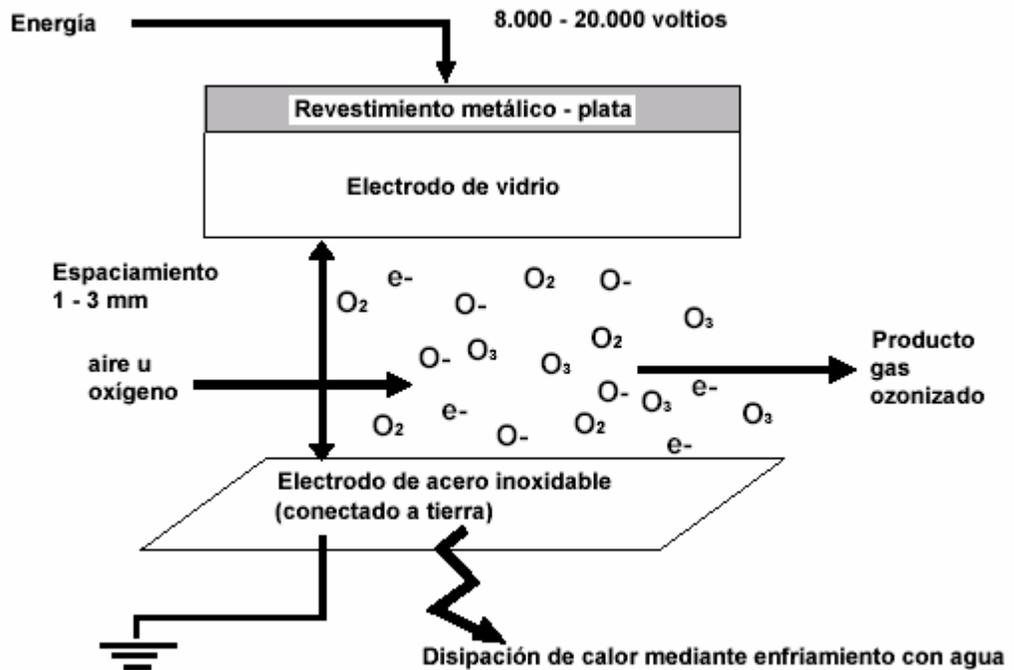
#### ***Subproductos de la desinfección con ozono***

Respecto al nivel de concentración del ozono para la desinfección del agua de consumo humano, no se conoce ningún efecto adverso directo sobre la salud. Sin embargo, al igual que el cloro, el ozono puede producir subproductos (SPD) como los bromatos, el bromoformo, el ácido bromoacético, los aldehídos, las cetonas y los ácidos carboxílicos. Entre ellos, los aldehídos son probablemente los de mayor inquietud para la salud, pero la información aún es insuficiente para evaluar los riesgos de la exposición a los mismos en el agua potable. Tal como en el caso del cloro, se deben sopesar los riesgos para la salud por la ausencia de desinfección y los riesgos para la salud por la presencia de subproductos. Dado que todavía quedan muchos campos de investigación que deben explorarse con referencia a los SPD de la ozonización de aguas naturales o tratadas, las pruebas actuales indican que desde el punto de vista de los efectos para la salud, la ozonización podría considerarse segura. Para la desinfección secundaria se recomienda que la cloración sea inmediata a la ozonización, lo cual permitirá una elevada reducción en la formación de THM. Asimismo, se recomienda que la ozonización esté seguida de carbón activado o de absorción por una capa biológica, debido a que ciertos compuestos después del proceso son más biodegradables que lo usual y se corre el riesgo de recrudescimiento biológico en los sistemas de distribución (Solsona y Méndez, 2002).

### ***Generadores de ozono***

Los sistemas de ozonización empleados en el tratamiento de agua generan ozono en el sitio de aplicación y casi todos lo hacen por medio de una descarga de corona producida entre dos dieléctricos, a través de las cuales pasa oxígeno o aire seco.

Los generadores de ozono patentados que se encuentran en el mercado en su mayoría son del tipo de tubo, placa de Otto y placa de Lowther. El diseño de placa de Otto, que es el más antiguo, opera a presión atmosférica o negativa y tiene la ventaja de que puede funcionar hasta puntos de condensación de  $-30^{\circ}$  C sin sufrir daños significativos, pero se está dejando de usar porque es el menos eficaz (Figura 2.14).



**Figura 2.14.** Generador Dieléctrico de Ozono.

El dispositivo de placa de Lowther, que es enfriado por aire y puede usar aire atmosférico u oxígeno puro, es el que requiere menos energía de todos y se ha utilizado en sistemas pequeños de abastecimiento de agua, pero hay pocos datos del resultado de su funcionamiento en el largo plazo.

El tipo de tubo horizontal, un dispositivo enfriado por agua, se emplea más para fines industriales y grandes plantas de tratamiento de agua, pero se han desarrollado varios tipos más pequeños para plantas de tratamiento de menor capacidad.

Una unidad patentada que usa tubos dieléctricos de poco diámetro es capaz de generar hasta 14% de ozono a partir de oxígeno, siendo este uno de los valores notificados hasta la fecha (Solsona y Méndez, 2002).

### **2.6.7 Desinfección por radiación solar**

Aunque la radiación ultravioleta (o luz ultravioleta o UV) no es popular en el tercer mundo, es el único método físico práctico que puede usarse para la desinfección del agua en comunidades pequeñas (con sistema centralizado de agua). Las aplicaciones prácticas de la radiación ultravioleta comenzaron en 1901 cuando se consiguió producir esta luz artificialmente. Esta técnica se consideró para la desinfección del agua de bebida cuando se comprobó que el cuarzo era una de los pocos materiales casi totalmente transparente a la radiación ultravioleta, lo que permitió la envoltura protectora de los tubos. Los primeros intentos experimentales se llevaron a cabo en Marsella, Francia, en 1910. Entre 1916 y 1926, se usó UV en los Estados Unidos para la desinfección del agua y para proveer agua potable a los barcos. Sin embargo, la popularidad del cloro y sus derivados, asociados a su bajo costo de aplicación, hicieron que se retardara la producción de equipos hasta la década de 1950 y más aún hasta la de 1970 en que las lámparas comienzan a ser confiables y de vida prolongada (Solsona y Méndez, 2002).

La aparición de los subproductos de la desinfección (SPD), sobretodo aquellos asociados a la desinfección con cloro, hicieron que numerosos sistemas pasaran de éste a la UV. Al comienzo del siglo XXI, en Europa existen unos 2,000 sistemas de aguas desinfectados con UV, y una planta en Alemania (Wahnachtalsperrenverband), trata nada menos que un caudal de 329,000m<sup>3</sup>/día.

La gran ventaja en relación con los SPD se contrabalancea con su notoria desventaja: la radiación UV no otorga ningún residual al agua tratada para hacer frente a

eventuales futuras contaminaciones en las redes de distribución o en las viviendas (Solsona y Méndez, 2002).

A pesar de esto último, la desinfección con radiación ultravioleta se ha venido utilizando ampliamente en los sistemas de abastecimiento de agua de pequeños establecimientos, como hospitales, industrias de alimentos y bebidas y hoteles. Recientemente se ha incrementado su uso para la desinfección de efluentes de plantas de tratamiento de aguas servidas y ha vuelto a recibir atención como desinfectante de pequeños sistemas de agua, debido a su capacidad de desinfectar sin producir cambios físicos o químicos notables en el agua tratada. Existe en el mercado una gama de equipos para grandes plantas de tratamiento de agua hasta un pequeño artilugio que cabe en una mano y que los caminantes usan para desinfectar aguas de lagos y ríos (Solsona y Méndez, 2002).

Se utiliza la energía natural del sol para calentar el agua, así como la radiación ultravioleta para la inactivación de microorganismos en agua. Este tema se abundará en el siguiente subcapítulo.

## **2.7 PROCESO DE DESINFECCIÓN SOLAR (SODIS)**

El método de desinfección solar usa la energía solar para destruir los microorganismos patógenos que causan enfermedades transmitidas por el agua y de esa manera mejora la calidad del agua utilizada para el consumo humano. La investigación sobre la desinfección solar del agua la inició el profesor Aftim Acra de la American University de Beirut. El trabajo de Acra motivó a la Asociación de Sistemas Integrales de Energía Rural (INRESA) a lanzar un proyecto ramificado en 1985. En 1988, el Brace Research Institute de Montreal organizó un taller para revisar los resultados de esta investigación de campo.

En 1991, un equipo interdisciplinario compuesto por ingenieros sanitarios, fotoquímicos, bacteriólogos y virólogos del Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Ambiental (EAWAG) mediante su departamento de Agua y Saneamiento en

Países en Desarrollo (SANDEC) inició exhaustivas pruebas de laboratorio y de campo para evaluar el potencial de SODIS y desarrollar un método de tratamiento del agua eficaz, sostenible y de bajo costo.

La investigación de laboratorio reveló sinergias en la inactivación de microorganismos mediante el uso combinado de radiación ultra violeta A (UV-A) y un incremento en la temperatura del agua. Las pruebas de campo confirmaron este efecto que amplía significativamente el potencial de este método de desinfección del agua utilizando la energía solar, conocido como SODIS. Posteriormente, se sometió este proceso simple de tratamiento del agua a pruebas de campo en proyectos de demostración para evaluar su aceptación sociocultural y económica por parte de la población. La respuesta y el interés por SODIS fueron muy positivos. Posteriormente, EAWAG/SANDEC empezó la difusión mundial de SODIS con el fin de promover este método en áreas donde no se cuenta con agua segura. Desde 1999, se lanzaron iniciativas y actividades locales de aplicación de SODIS en varios países de América Latina, así como en Indonesia, Sri Lanka, India, Nepal, Pakistán, Uzbekistán, Kenya, Sudáfrica, Angola. (Meierhofer y Wegelin, 2002). Se ha demostrado que el agua puede ser efectivamente tratada para agentes virales y bacterias por medio de un recurso de disposición libre, la luz solar (Carey y col., 2004).

Por primera vez en su historia de 140 años, la Cruz Roja Suiza otorga un premio. El premio fue entregado a Martin Wegelin, presidente de la Fundación SODIS y líder de la iniciativa mundial de SODIS, el día Sábado, 24 de junio de 2006, en la sala del parlamento suizo en Berna. En su presentación ante el parlamento, Martin Wegelin reconoció la importancia y los avances del trabajo de la Cruz Roja, y también agradeció a las instituciones que han apoyado para que el método ha crecido tanto en los últimos años: EAWAG/SANDEC, la Fundación AVINA Suiza, LED, Michel Comte Water Foundation, etc.

El Premio Latinoamericano y del Caribe del Agua (PLACA) es uno de los premios más importantes de la región relacionado con el agua. Un comité internacional conformado por expertos de América Latina y de otros continentes evalúa y selecciona a los ganadores. Este premio lo otorgan de manera conjunta el Centro del Agua del Trópico

Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC) y Plan Internacional – Oficina Regional para las Américas, y es promocionado por UNESCO y PNUMA, entre otros.

Este año la FUNDACIÓN SODIS fue seleccionada como ganadora del premio PLACA, con su trabajo titulado “LA PROMOCION DE LA DESINFECCIÓN SOLAR DEL AGUA EN AMERICA LATINA”. Acto realizado el miércoles 11 de octubre del 2006, en el Centro de Visitantes de las Esclusas de Miraflores, en el Canal de Panamá, el acto de entrega de los Premios Latinoamericanos y del Caribe del Agua - PLACA 2006.

### **2.7.1 Mecanismos del proceso de SODIS**

Los microorganismos patógenos son vulnerables a dos efectos de la luz solar: la radiación en el espectro de luz UV-A (longitud de onda 320-400nm) y el calor (incremento en la temperatura del agua). Se produce una sinergia entre estos dos efectos, ya que el efecto combinado de ambos es mucho mayor que la suma de cada uno de ellos independientemente. Se han realizado investigaciones sobre formulación de modelos matemático para predecir la desinfección solar en función de la cantidad de radiación solar (Fadhil, 2003).

La radiación UV-A interactúa directamente con el ADN, los ácidos nucleicos y las enzimas de las células vivas, cambia la estructura molecular y puede producir la muerte de la célula. La radiación UV también reacciona con el oxígeno disuelto en el agua y produce formas altamente reactivas de oxígenos (radicales libres de oxígeno y peróxidos de hidrógeno). Estas moléculas también interfieren con las estructuras celulares y matan a los patógenos.

Efectos de la temperatura, otro aspecto de la luz solar es la radiación de onda larga, denominada infrarroja. Esta radiación tampoco la puede ver el ojo humano, pero podemos sentir el calor producido por la luz con una longitud de onda superior a 700 nm. La radiación infrarroja absorbida por el agua es responsable de su calentamiento.

SODIS es ideal para desinfectar pequeñas cantidades de agua con baja turbiedad. Se llena el agua contaminada en botellas de plástico transparente, las cuales se exponen a la luz solar durante seis horas. La exposición al sol destruye los patógenos. Cuando la nubosidad es mayor de 50%, es necesario exponer las botellas de plástico durante 2 días consecutivos. (Meierhofer y Wegelin, 2002).

### **2.7.2 Energía solar**

La energía electromagnética abarca todos los tipos de la energía que viajan de su fuente a través del espacio en la forma de ondas a lo largo de las trayectorias rectas a la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/sec). La radiación es el término que pertenece a la emisión y a la propagación de la energía electromagnética en la forma de ondas.

La radiación electromagnética, así como la radiación solar, se clasifica comúnmente en base de longitud de onda de la radiación en varias regiones. El cuadro 2.7 nos muestra la clasificación de las bandas espectrales de la energía solar y el efecto atmosférico.

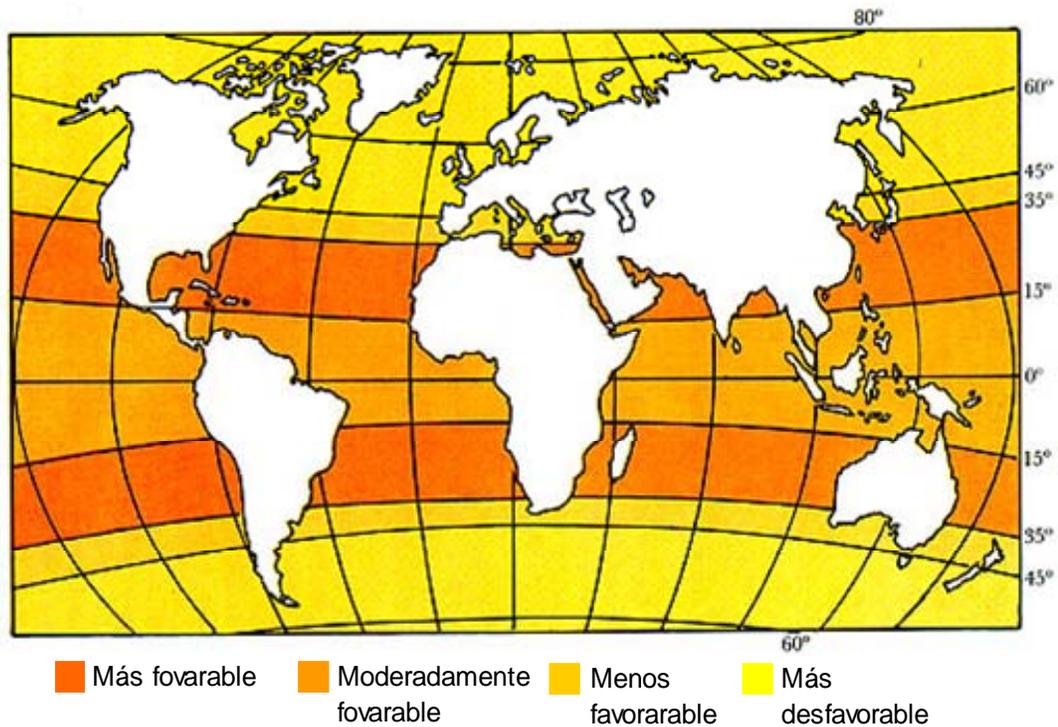
La energía solar que alcanza la periferia de la atmósfera de la tierra se considera como constante para todos los propósitos prácticos, y se conoce como la constante solar. Debido a la dificultad en la realización de medidas exactas, el valor exacto de la constante solar no se sabe con certeza sino se cree que esta entre 1353 y 1395  $\text{W/m}^2$  (aproximadamente 1,4  $\text{Kw/m}^2$ , o 2,0  $\text{cal/cm}^2$  /minuto). El valor constante solar se estima en base de la radiación solar recibida en un área de unidad expuesta perpendicular a los rayos entre del sol en una distancia media el sol y la tierra (Acra, 1984). La radiación solar puede dividirse en tres rangos de longitud de onda: radiación UV, luz visible y radiación infrarroja. El ojo humano no puede percibir la radiación UV que tiene un rango de radiación muy agresiva que puede causar daños severos a la piel y los ojos y puede destruir las células vivas. Afortunadamente, la mayoría de la luz UV-C y UV-B en el rango de 200 a 320 nm es absorbida por la capa de ozono ( $\text{O}_3$ ) en la atmósfera que protege a la tierra de

un gran porcentaje de la radiación solar proveniente del espacio. Sólo una fracción de la radiación UV-A, con un rango de longitud de onda más alto, 320 a 400 nm, cercano a la luz violeta visible, llega a la superficie de la tierra.

**Cuadro 2.7** Bandas espectrales de la energía sola y efecto atmosférico

<b>Banda</b>	<b>Longitud de onda (nm)</b>	<b>Efectos Atmosféricos</b>
<b>Rayo gamma</b>	< 0,03	Absorbido totalmente por la atmósfera superior
<b>Radiografía</b>	0,03 – 3	Absorbido totalmente por la atmósfera superior
<b>Ultravioleta</b>		
(b) UV	3 – 300	Absorbido totalmente por el oxígeno, el nitrógeno, y el ozono en la atmósfera superior
(a) UV	300 – 400	Se transmite con la atmósfera, pero la dispersión atmosférica severa
Visible	400 – 700	Transmitido a través de la atmósfera, con la dispersión moderada de las ondas cortas
<b>Infrarrojo, IR</b>		
IR Reflejada	700 - 3000	Sobre todo radiación reflejada
IR Termal	3000 - 14000	Absorción en las longitudes de onda específicas por el bióxido de carbono, el ozono, y el vapor de agua, con dos ventanas atmosféricas importantes

En la figura 2.15 podemos observar la distribución mundial de la radiación solar que indica la viabilidad de usos solares. Es importante observar que la mayoría de países en vías de desarrollo caen dentro de las regiones más favorables entre las latitudes 35°N y 35°S. Por esta razón pueden contar en la radiación solar como fuente firme de la energía que se pueda usar para la desinfección solar, la mayor parte de México es favorable para aprovechar este medio natural con fines de exposición solar e inactivar microorganismos del agua contaminada.



**Figura 2.15** Distribución Mundial de la radiación solar (Meierhofer y Wegelin, 2002)

### 2.7.3 Factores que influyen sobre el proceso de SODIS

La eficiencia en la desinfección de proceso SODIS depende de la cantidad de luz solar disponible; sin embargo, la radiación solar se distribuye de manera irregular y su intensidad varía de una ubicación geográfica a otra, dependiendo de la latitud, la estación y la hora del día., también influye la turbiedad, el oxígeno disuelto, el color, fuentes de reflexión solar.

#### *a) Radiación UV- A y Temperatura*

La luz solar desinfecta el agua y mata a los agentes causantes de la diarrea, gracias a la combinación de dos efectos: la radiación ultravioleta y el incremento de temperatura del agua. Para que el método funcione eficazmente es necesaria una exposición de cinco horas bajo una radiación solar de al menos 500 W/m<sup>2</sup>. Esto se consigue en latitudes medias

con cinco horas de exposición en verano. El efecto conjunto de la temperatura y la radiación se produce cuando el agua supera los 50°C, momento a partir del cual el proceso de desinfección requiere un tercio de la radiación. El agua es apta para el consumo tras una hora de exposición a más de 50 °C. (Meierhofer y Wegelin, 2002)

La radiación UV-A, tiene efecto germicida y la temperatura, la radiación infrarroja, eleva la temperatura del agua y genera el efecto de pasteurización cuando la temperatura llega a 70-75°C. El uso combinado de la radiación UV-A y del calor produce un efecto de sinergia que incrementa la eficacia del proceso.

#### ***b) Turbiedad***

Las partículas suspendidas en el agua reducen la penetración de la radiación solar en el agua e impiden que los microorganismos sean irradiados. Por lo tanto, la eficacia de desinfección de SODIS se ve reducida en agua turbia.

SODIS requiere agua relativamente clara con una turbiedad menor a 30 UNT, si la turbiedad del agua es mayor a 30 UNT, es necesario pretratar el agua antes de exponerla a la luz solar. Los sólidos y partículas más grandes se pueden eliminar almacenando el agua cruda durante un día y dejando que las partículas se asienten en el fondo y luego, se decanta el agua. Se puede separar la materia sólida mediante filtración, usando una capa de arena o un paño (Kehoe y col., 2001; Meierhofer y Wegelin, 2002).

#### ***c) Oxígeno disuelto***

SODIS es más eficaz en agua con altos niveles de oxígeno: la luz solar produce formas altamente reactivas de oxígeno (radicales libres de oxígeno y peróxidos de hidrógeno) en el agua. Estas moléculas reactivas reaccionan con las estructuras celulares y matan a los patógenos (Meierhofer y Wegelin, 2002), En un experimento se realizaron pruebas de desinfección de agua con agitación y sin agitación dando como resultado que a mayor cantidad de oxígeno favorece la desactivación por lo cual se recomienda llenar la botella de agua a  $\frac{3}{4}$  del volumen, agitar vigorosamente durante 1 minuto al inicio y después llenar completamente el cual garantiza el máximo contenido de oxígeno disuelto (Kehoe y col., 2001).

*d) Color*

Las pruebas han demostrado que los altos niveles de color en el agua incrementan el tiempo requerido para la inactivación de los patógenos.

*e) Uso de concentradores de la luz solar*

Es posible mejorar la eficacia del tratamiento si las botellas de plástico se exponen a la luz solar mediante superficies reflectoras como calaminas de aluminio o hierro corrugado. El uso de papel aluminio como reflejante mejoro significativamente la desactivación (Kehoe y col., 2001).

**2.7.4 Ventajas del proceso de SODIS**

- Mejora la calidad microbiológica del agua para consumo humano
- Mejora la salud de la familia.
- Puede servir como un punto de entrada para la educación en salud e higiene.
- Los sistemas públicos de abastecimiento de agua en los países en desarrollo frecuentemente no garantizan el suministro de agua segura para el consumo humano.
- Brinda a los usuarios individuales un método simple que se puede aplicar a nivel del hogar bajo su propio control y responsabilidad.
- Fácil de entender.
- Está al alcance de todos, pues los únicos recursos necesarios son la luz solar, que es gratis, y botellas de plástico.
- No requiere de gran infraestructura costosa, por lo que es fácilmente replicable en proyectos de autoayuda.

- Reduce la necesidad de fuentes tradicionales de energía, como la leña, el kerosén y el gas. En consecuencia, el uso de SODIS reduce tanto la deforestación, un problema ambiental importante en la mayoría de los países en desarrollo, como la contaminación del aire creada por la combustión de fuentes convencionales de energía.
- Las mujeres y los niños con frecuencia dedican gran parte de su tiempo y energía en recoger leña. SODIS reduce esta carga, pues es necesario obtener menos leña.
- Ventajas financieras: Es posible reducir los gastos familiares, al mejorar la salud de sus integrantes, ya que se requieren menos recursos financieros para la atención médica (Meierhofer y Wegelin, 2002).

#### **2.7.5 Limitaciones del proceso del SODIS**

- Requiere suficiente radiación solar; por lo tanto, depende de las condiciones climáticas.
- Requiere que el agua no esté turbia.
- Requiere no cambia la calidad química del agua.
- No es útil para tratar grandes volúmenes de agua (Meierhofer y Wegelin, 2002).

#### **2.7.6 Aplicación del proceso SODIS**

El proceso se basa en una preparación del agua y la exposición solar. A continuación se explica con detalle el proceso SODIS (figura 2.16):

1. Verifique si las condiciones climáticas son adecuadas para SODIS (Si el cielo está más que 50% nublado, esponga las botellas 2 días consecutivos).
2. Obtenga botellas de plástico PET de hasta 2 litros. Idealmente deberían exponerse al sol por lo menos 2 botellas por cada miembro de la familia, mientras que otras

2 botellas deben estar listas para el consumo. Por lo tanto, cada miembro de la familia requiere 4 botellas de plástico para aplicar SODIS.

3. Verifique que las botellas sean herméticas, incluido el estado de la tapa.
4. Elija un soporte adecuado para exponer la botella, por ejemplo una calamina.
5. Verifique que el agua esté lo suficientemente clara para SODIS (turbiedad < 30 UNT). El agua con mayor turbiedad necesita pretratamiento antes de poder aplicar SODIS.
6. Por lo menos dos miembros de la familia deben estar capacitados en la aplicación de SODIS.
7. Una persona determinada debe ser la responsable de exponer las botellas SODIS al sol.
8. Reemplace las botellas viejas o rayadas.



Figura 2.16. Proceso SODIS

## 2.8 PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (AOPs)

Los AOPs consisten en la oxidación de contaminantes orgánicos en agua o aire, hacen uso de diferentes sistemas de reacción, tal como  $\text{TiO}_2$ , Peroxido de hidrogeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), Ozono ( $\text{O}_3$ ), todos ellos tienen la misma característica química: Producción de radicales OH ( $\cdot\text{OH}$ ), estas especies son extremadamente reactivas (EPA, 1998). Los AOPs

son utilizados en plantas de tratamiento de agua donde el proceso biológico es ineficiente para la degradación de compuestos orgánicos bio-recalcitrantes (No biodegradados), de hecho hay investigaciones donde se proponen los AOPs como un pretratamiento al proceso biológico (Malato y col., 2000; Vidal y Martín, 2001; Hermann y col., 2002; Parra y col., 2002; Gao y col., 2003; Guillard y col., 2003; Augugliaro y col., 2004).

Poca investigación hay respecto a la utilización de los AOPs en la inactivación de microorganismos, acreditado a la generación de  $\cdot\text{OH}$  y súper oxido  $\text{O}_2\cdot^-$  por la descomposición del agua en presencia del  $\text{TiO}_2$ , este proceso es mencionado ya que es importante para plantear la combinación entre los AOP's y el proceso SODIS, es decir utilizar la luz solar en combinación con este foto catalizador para inactivar microorganismos patógenos del agua. Aparte de tener el potencial de la descontaminación biológica también puede degradar compuestos químicos.

## 2.9 FOTO CATALÍISIS

Los semiconductores son óxidos de metal foto-reactivos empleados en los procesos de oxidación de contaminantes y son referidos como foto-catalísis. Los semiconductores están caracterizados por medio de una banda de valencia de energía baja, banda de conducción de energía alto.

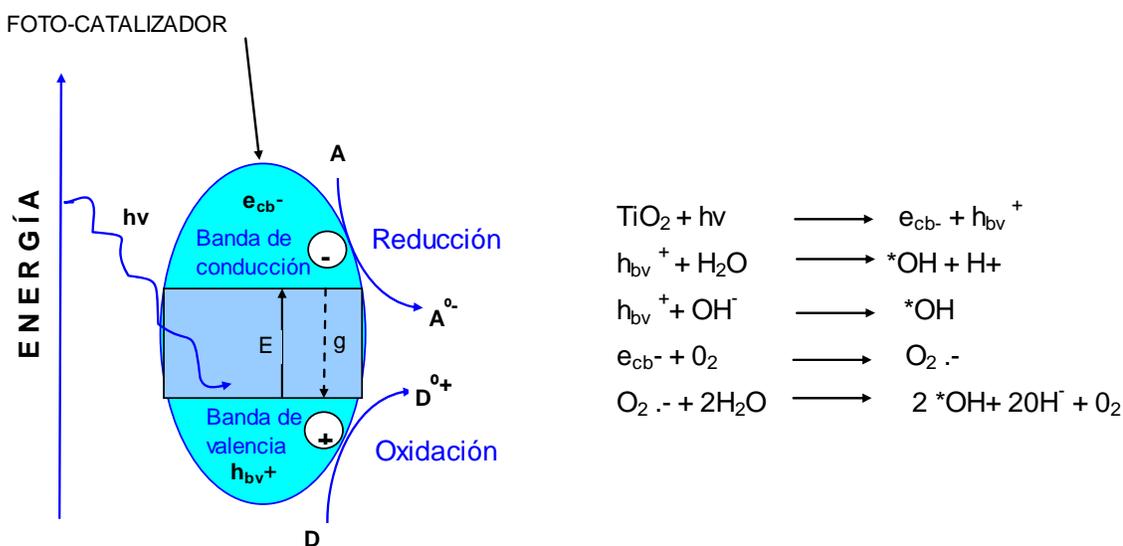


Figura 2.17 Mecanismo de un foto-catalizador (Cho y col., 2005; Ireland y col., 1993)

Los electrones no pueden salir dentro de la región de banda entre la banda de valencia y la banda de conducción, cuando se expone a la luz ultra violeta de longitud de onda apropiada, los electrones en la banda de valencia de baja energía absorberán los fotones de energía, para llegar ha ser excitados, y moverse dentro de la banda de conducción de alta energía. Los resultados de este electrón excitado es una carga positiva, en la banda de valencia ( $h_{bv}^+$ ) y un electrón dentro de la banda de conducción ( $e_{-cb}$ ). Este par de electrones es un estado excitado, inestable y regresara a su estado original en nanosegundos, (EPA, 1998). En la siguiente figura 2.17 se ilustra la absorción de fotones de energía ( $h\nu$ ) por los electrones de la banda de valencia y son excitados, los cuales se mueven dentro de la banda de conducción.

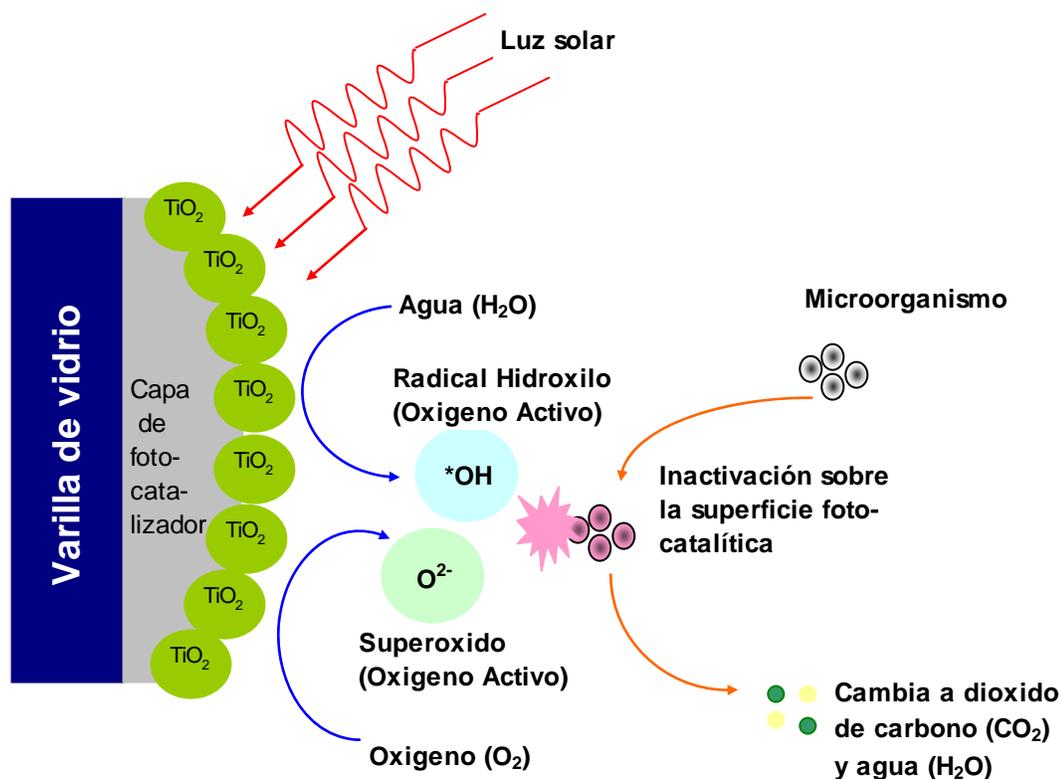
## 2.10 DIÓXIDO DE TITANIO (TiO<sub>2</sub>)

Las reacciones de reducción y oxidación foto-catalíticas sobre la superficie del TiO<sub>2</sub> han sido ampliamente investigadas como un método efectivo para purificación ambiental desde que fue descubierto el efecto de Honda-Fujishima (Fujishima, 1972). Por lo cual el TiO<sub>2</sub> ha atraído gran atención como material alternativo para ayudar a la purificación del aire y del agua.

En 1985, Matsunaga y sus colaboradores de trabajo divulgaron que las células microbianas en agua se podrían morir por el contacto con TiO<sub>2</sub> y la luz cercana al UV por 60 a 120 minutos (Matsunaga, 1985). Más tarde, el mismo grupo de trabajadores construyó con éxito un dispositivo fotoquímico donde el TiO<sub>2</sub> fue inmovilizado en una membrana de la acetilcelulosa. Una suspensión del *Scherichia Coli* que atravesaba este dispositivo fue totalmente muerta (Matsunaga y col., 1985). La muerte de las células de cáncer con el fotocatalizador TiO<sub>2</sub> para los usos médicos también se ha investigada (Bekbölet y Araz, 1996; Blanke y col., 1999).

Mecanismos de la muerte de los microorganismos (figura 2.18), la oxidación directa de la CoA que inhibía la respiración celular y consecuentemente la muerte de las células fue propuesta como el primer modo de muerte por Matsunaga (Matsunaga y col.,

1985). Estudios de la muerte foto-catalítica con  $\text{TiO}_2$  (Matsunaga y col., 1985; Saito y col., 1992; Sjogren y Sierka, 1994; Pham y col., 1995) han revelado que la sensibilidad de los microorganismos al  $\text{TiO}_2$  es en el siguiente orden Virus > Células de bacterias > Esporas de bacterias. Esto sugiere que los diferentes microorganismos respondan diferente al foto-catalizador  $\text{TiO}_2$  debido a sus diferentes estructuras, particularmente en complejidad y el espesor de la envoltente celular.



**Figura 2.18** Mecanismo foto-catalítico del dióxido de titanio

El  $\text{TiO}_2$  es el semiconductor más frecuentemente empleado debido a su alto nivel de fotoconductividad, bajo costo, baja toxicidad, resistencia a foto-corrosión y a su eficiencia catalítica (EPA, 1998; Transito, 2003). El Degusta P25 es comercialmente disponible y es generalmente aceptado como estándar foto catalítico de dióxido de titanio

(EPA, 1998). Se ha demostrado la habilidad del  $\text{TiO}_2$  como un método germicida, en Ireland (1993) fue el primer reporte de inactivación de microorganismos en aguas usando  $\text{TiO}_2$  como un foto catalizador con lámparas de luz ultravioleta, observándose rápida muerte de células, el efecto fue atribuido a la generación de radicales  $\text{OH}^*$  (Ireland y Valinierks, 1992; Herrera y col., 2000).

El dióxido de titanio es usado como aditivo de colorante en pinturas, alimentos, medicamentos, papel grado sanitario. En los países de Estados Unidos y Japón están siendo usado como aditivo de alimentos desde 1968 y 1983 respectivamente, en nuestro país las normas establecen el uso de  $\text{TiO}_2$  como aditivo, por ejemplo la NORMA Oficial Mexicana NOM-185-SSA1-2002, Productos y servicios. Mantequilla, cremas, producto lácteo condensado azucarado, productos lácteos fermentados y acidificados, dulces a base de leche. Especificaciones sanitarias y la NORMA Oficial Mexicana NOM-194-SSA1-2002. Productos y Servicios. Especificaciones sanitarias en los establecimientos dedicados al sacrificio y faenado de animales para abasto, almacenamiento, transporte y expendio. Especificaciones sanitarias de productos, permiten el uso del aditivo en una concentración a las Buenas Practicas de Fabricación, el cual se refiere a la cantidad mínima indispensable para lograr el efecto deseado.

En la Norma oficial Mexicana NOM-147-SSA1-1996, Bienes y servicios. Cereales y sus productos. Harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de cereales, de semillas comestibles, harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales, establecen el uso de  $\text{TiO}_2$  como colorante con un límite de 10 g/kg.

## CAPITULO III. METODOLOGIA

En este capítulo se expone la metodología que se llevó a cabo para lograr desinfectar el agua para consumo humano usando luz solar y dióxido de titanio inmovilizado. Esta se realizó en cuatro etapas, las cuales se explicarán con detalle a continuación:

**3.1** Inmovilización de  $\text{TiO}_2$  sobre varillas de vidrio.

**3.2** Desinfección solar con diferentes concentraciones de  $\text{TiO}_2$ .

**3.3** Comparación de la inactivación de coliformes totales y fecal con SODIS convencional y SODIS/ $\text{TiO}_2$ .

**3.4** Determinación del tiempo recomendado para consumir el agua después de desinfectarla (caducidad).

### **3.1 INMOVILIZACIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO SOBRE VARILLAS DE VIDRIO.**

El método para producir dióxido de titanio inmovilizado sobre varillas de vidrio es llamado Dip-Coating (Kim, 2004). Este procedimiento fue utilizado en la Universidad de California, San Diego para la fijación de dióxido de titanio en pequeños tubos para la experimentación con un reactor foto-catalítico, con el objetivo de determinar la cinética química en la degradación del ácido benzoico que sirvió como diseño de una planta de remediación de agua residual. A continuación se explica el procedimiento:

#### ***Procedimiento Dip-Coating:***

a) Se prepararon 100 mL de una solución de dióxido de titanio con agua desmineralizada al 5% en peso (Se pesaron 5 g. de  $\text{TiO}_2$  en balanza analítica y se aforó con agua desmineralizada en un matraz de 100 mL), el dióxido de titanio utilizado es grado analítico del proveedor Productos Químicos Monterrey, S. A.

**b)** La mezcla se colocó en un baño ultrasónico (equipo marca Fisher) por 30 minutos, para asegurar una capa uniforme.

**c)** Se utilizó varilla de vidrio de 5 y 6 mm. de diámetro, que sirve de soporte para inmovilizar el  $\text{TiO}_2$ , la longitud de la varilla es aproximadamente del 65-90% (23-35 cm) de la longitud de la botella.

**d)** Se rasparon las varillas con lija de agua para incrementar la rugosidad de la superficie (Se hizo pasar la lija 20 veces a lo largo de la varilla).

**e)** Se lavaron las varillas con agua destilada y se dejaron secar a 70 °C por dos horas.

**f)** Se pesaron cada una de las varillas.

**g)** Se colocó la solución de  $\text{TiO}_2$ , en una bureta de 25 mL.

**h)** Cada una de las varilla es sumergida en la solución de  $\text{TiO}_2$  y se saca lentamente para que se forme una película de dióxido de titanio en la pared de la varilla.

**i)** Posteriormente se dejaron secar en un horno a 35 °C por dos horas.

**j)** Se repiten los pasos del h al e hasta por doce veces para producir el espesor de la capa de catalizador.

**k)** Finalmente el recubrimiento es calcinado en un horno a 300 °C por cuatro horas y se vuelven a pesar cada una de las varillas.

Demostración de la habilidad del  $\text{TiO}_2$  inmovilizado para degradar un compuesto orgánico (Un colorante rojo) por foto-catálisis usando radiación ultravioleta natural.

Con el fin de demostrar la actividad del catalizador se realizó una prueba muy sencilla, que consistió en la degradación de un compuesto orgánico disuelto en agua para ello, se observó la decoloración del agua en intervalos de tiempo de 15 minutos. El procedimiento fue:

**a)** Una tableta de color rojo orgánico (rojo congo) se disolvió en agua destilada.

**b)** Se llenó un tubo con la solución del colorante rojo congo.

**c)** Se colocó una varilla de tubo de vidrio con catalizador  $\text{TiO}_2$  inmovilizado.

**d)** Se Selló la abertura del tubo de prueba, para prever perdida por evaporación.

**e)** Se expusó a la luz solar por un tiempo de sesenta minutos.

- f) Se le dió seguimiento a la degradación del compuesto, observándolo cada 15 minutos la pérdida de color rojo en el agua (Guillard y col., 2003).

### 3.2 DESINFECCIÓN SOLAR CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE (TIO<sub>2</sub>)

Para la realización de esta investigación se tomó la muestra de agua de una comunidad rural llamada Hoya de Álvarez del municipio de Valle de Santiago, Guanajuato (Figura 3.1). El agua es de un ojo de agua natural que utiliza la comunidad para consumo y uso humano de la propia comunidad. Se siguieron los puntos de la Norma Oficial Mexicana. 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.



**Figura 3.1** Toma de muestra en Hoya de Álvarez del municipio de Valle de Santiago, Guanajuato.

Antes de iniciar la parte experimental todo el material utilizado se esterilizó en una olla Express a 121°C por 15 minutos, también se utilizó un horno modelo FE291, 220°C, 750w/117V para esterilizar material a 180 °C / 1 h.

El reactor *batch* consistió de botellas de PET de 2.5 litros de volumen en donde se introdujeron las varillas de vidrio con TiO<sub>2</sub> inmovilizado.

Se llevaron a cabo 3 tratamientos diferentes y cada uno por triplicado, usando para cada uno de ellos concentraciones diferentes de TiO<sub>2</sub> inmovilizado (cuadro 3.1).

**Cuadro. 3.1** Matriz Experimental a diferentes concentraciones de TiO<sub>2</sub>.

<b>Tratamiento</b>	<b>TiO<sub>2</sub> (g/l)</b>
Control	0
1	0.288
2	0.5011
3	1.0073

El procedimiento que se llevó a cabo para cada uno de los tratamientos fue el siguiente:

**a)** Se pintó la mitad de la botella con pintura de color negro para incrementar la colección de radiación solar y hacer más eficiente el proceso de desinfección (Martín y col., 2004).

**b)** Se lavaron las botellas de plástico (Tereftalato de polietileno-PET) con detergente libre de sulfatos, se enjuagaron con agua desmineralizada y se dejaron secar (incluye procedimiento para la tapa).

**c)** Las botellas se desinfectaron por exposición en luz ultra violeta durante 1 hora, utilizando lámpara germicida de 15 w, modelo G15T8, marca VIS.

**d)** A cada una de las botellas se les adicionó 1875 ml del agua de prueba.

**e)** Se tapó y agitó vigorosamente por 1 minuto la botella, con el objetivo de incrementar el contenido de oxígeno disuelto.

**f)** Se introdujeron las varillas de vidrio con TiO<sub>2</sub> inmovilizado (se colocaron los gramos de dióxido de titanio correspondientes a cada tratamiento).

- g) Se llenaron por completo de las botellas con el agua de prueba.
- h) Se expusieron las botellas en forma horizontal-inclinada a la luz solar a partir de las 11:00 a.m. hasta las 16:00 p.m.
- i) Posteriormente se agitaron las botellas por 20 segundos cada hora de exposición.
- j) A intervalos de tiempo de una hora se tomó una muestra de cada botella, para su análisis microbiológico y fisicoquímico.
- k) Posteriormente se determinó la temperatura de cada muestra.
- l) Finalmente se determinaron coliformes totales y fecales de cada muestra por el método del sustrato cromogénico.

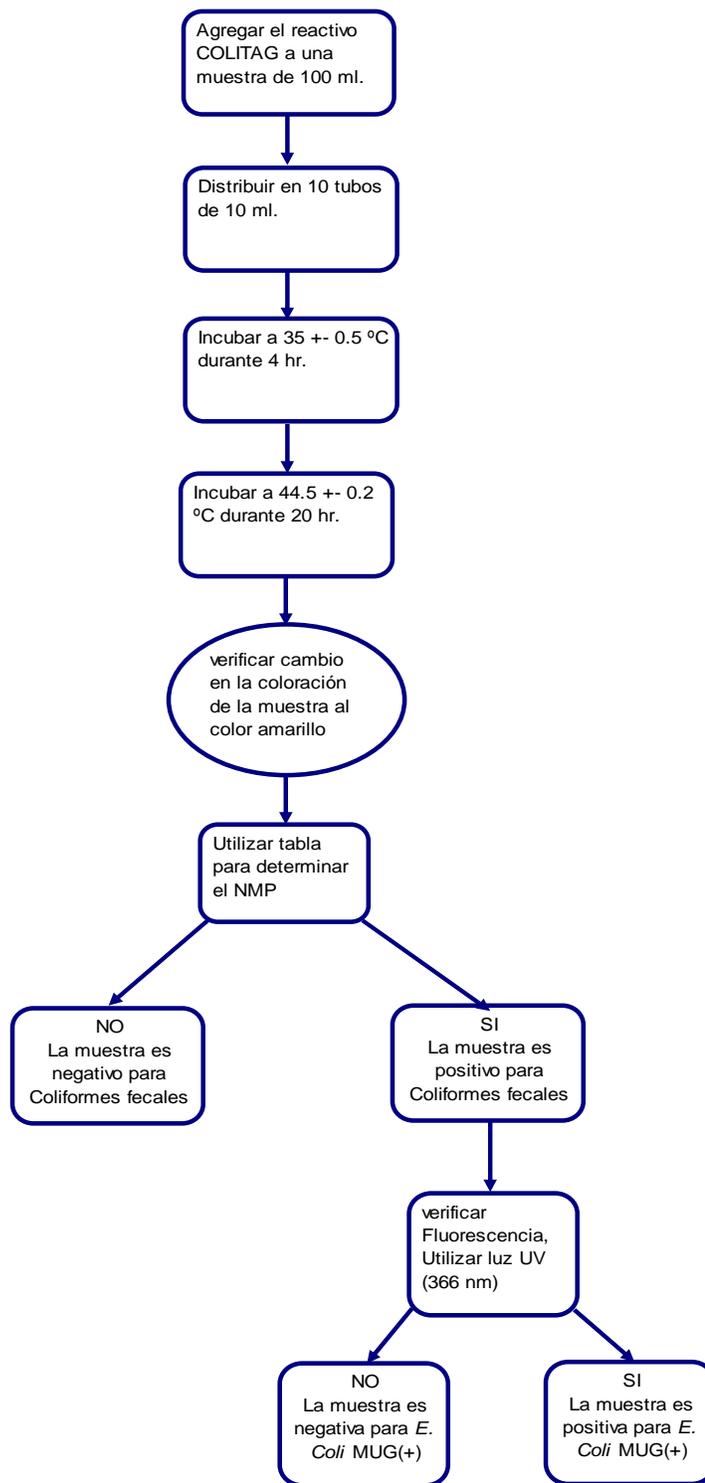
Este método se fundamenta en el uso de sustratos cromogénicos hidrolizables para la detección de enzimas de bacterias coliformes. Cuando se utiliza esta técnica, el grupo se define como todas las bacterias que poseen la enzima  $\beta$ -D-galactosidasa y capaces de romper el sustrato cromogénico, dando como resultado una liberación del cromógeno. A diferencia del método de fermentación de lactosa que permite el crecimiento de muchos organismos aeróbicos y elimina o suprime algunos no-coliformes con inhibidores químicos, esta técnica provee nutrientes que son más selectivos y específicos para el crecimiento de coliformes (NOM-180-SSA1-1998).

En la figura 3.2 se esquematiza el método de sustrato cromogénico para la determinación de coliformes totales.

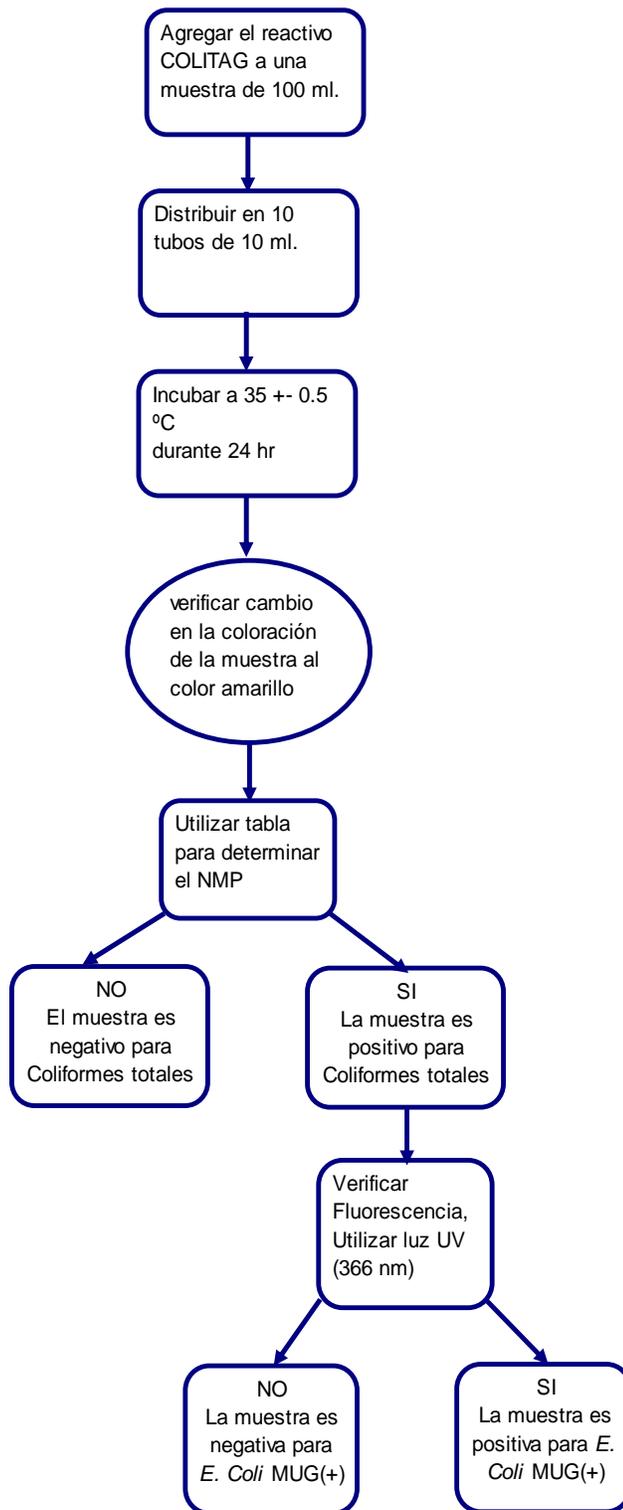
En la figura 3.3 se esquematiza el método de sustrato cromogénico para la determinación de coliformes fecales.

El procedimiento de la figura 3.2 y 3.3 se realiza con un reactivo llamado COLITAG, que es un reactivo de sustrato cromogénico aprobado por la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) que ofrece un método seguro, sencillo rápido y preciso para detectar las bacterias indicadoras de contaminación fecal en agua.

Para la preparación y dilución de la muestra se utilizó el procedimiento de la NOM-110-SSA1-1994 “ Bienes y servicios. Preparación y dilución de el muestras de alimentos para su análisis microbiológico”.



**Figura 3.2** Método de sustrato cromogénico para determinar coliformes totales.



**Figura 3.3** Método de sustrato cromogénico para determinar coliformes fecales.

### 3.3 COMPARACIÓN DE LA INACTIVACIÓN DE COLIFORMES TOTALES Y COLIFORMES FECALES USANDO SODIS Y SODIS/TiO<sub>2</sub> INMOVILIZADO.

Después de haber determinado la concentración óptima de TiO<sub>2</sub> para inactivar el agua de coliformes totales y fecales, se procedió a comparar el método de SODIS con SODIS/TiO<sub>2</sub> para ello se utilizaron botellas de plástico (PET) de dos litros y medio de capacidad y cada tratamiento se realizó por triplicado (Cuadro 3.2).

**Cuadro 3.2** Matriz Experimental para la desinfección SODIS y SODIS/TiO<sub>2</sub> Inmovilizado.

Tratamiento	TiO <sub>2</sub>	Luz solar
Control	0 g/L	Sin exposición solar
SODIS	0 g/L	Con exposición solar
SODIS / TiO <sub>2</sub>	1 g/L	Con exposición solar

El procedimiento que se realizó se explica a continuación:

- a) Se pintó la mitad de la botella con pintura de color negro para incrementar la colección solar y hacer más eficiente el proceso de desinfección (Martín y col., 2004).
- b) Se lavaron las botellas de plástico (Tereftalato de polietileno-PET) con detergente libre de sulfatos, se enjuagaron con agua desmineralizada y se dejaron secar (incluye procedimiento para la tapa).
- c) Las botellas se desinfectaron con exposición de luz ultra violeta durante 1 hora, utilizando lámpara de germicida de 15 w, modelo G15T8, marca VIS.
- d) A cada una de las botellas se les adicionó 1875 mL del agua de prueba.
- e) Se tapó y agitó vigorosamente por 1 minuto la botella, con el objetivo de incrementar el contenido de oxígeno disuelto.
- f) Se introdujeron las varillas de vidrio con TiO<sub>2</sub> inmovilizado (se colocaron los gramos de dióxido de titanio correspondientes a cada tratamiento).

- g) Se llenó completamente las botellas con el agua de prueba.
- h) Se expusieron las botellas en forma horizontal-inclinada a la luz solar a partir de las 11:00 a.m. hasta las 16:00 p.m.
- i) Posteriormente se agitaron las botellas por 20 segundos cada hora de exposición.
- j) A intervalos de tiempo de una hora se toma una muestra de cada botella, para su análisis microbiológico y fisicoquímico.
- k) Posteriormente se determinó la temperatura de cada muestra.
- l) Se determinaron las bacterias coliformes y fecales de cada muestra por el método del sustrato cromogénico (explicado anteriormente).
- m) Finalmente se comparó la velocidad de inactivación del método de SODIS y SODIS/ TiO<sub>2</sub>

### **3.4 RECRECIMIENTO DE COLIFORMES TOTALES EN EL PROCESO SODIS Y SODIS CON TIO<sub>2</sub>**

Una vez desinfectada el agua, se determinaron coliformes totales, a diferentes intervalos de tiempo para observar posible recrecimiento de microorganismos. Lo anterior se hizo con la finalidad de determinar el tiempo recomendado para consumir el agua después de desinfectarla. La primera muestra se obtuvo después de 24 horas de la desinfección, la segunda después de 48 h. y así sucesivamente se monitoreó durante siete días.

## CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capitulo se exponen los resultados de la concentración de dióxido de titanio inmovilizado en diferentes varillas, la variación de la desinfección solar con diferentes concentraciones de  $\text{TiO}_2$  y la comparación de estos resultados con el proceso de desinfección solar tradicional (SODIS). Con respecto a la calidad del agua, se presentan los resultados de los análisis microbiológicos y la comparación de éstos con la norma que rigen los límites máximos permisibles de la calidad del agua para consumo humano (NOM-127-SSA1-1994).

De igual manera se señala el tiempo de caducidad que presenta el agua tratada con este procedimiento, a manera de poder definir el periodo de tiempo seguro, en que se puede consumir el agua sin riesgo de contraer alguna enfermedad. Lo anterior se estableció después de haber analizado coliformes totales en diferentes intervalos de tiempo.

### 4.1 RESULTADOS DE LA INMOVILIZACIÓN DE $\text{TiO}_2$ SOBRE VARILLAS DE VIDRIO.

Se inmovilizaron 49 varillas con dióxido de titanio  $\text{TiO}_2$  por el método de Dip-Coating, (Figura 4.1) explicado en el subcapitulo 3.1, se hizo el registro del peso inicial y final de cada una de las varillas y por diferencia de éstos se determinó la cantidad de  $\text{TiO}_2$  inmovilizado así como el espesor logrado para cada una de las varillas. Los resultados pueden ser observados en el cuadro 4.1.

**Cuadro 4.1** Resultados de la inmovilización de  $\text{TiO}_2$  en cada varilla de vidrio

No. varilla	Peso del $\text{TiO}_2$ G	Peso inicial de varilla g	Peso final de varilla g	Longitud de varilla cm	Diámetro de varilla mm	Espesor mm
1	0.10809	15.25721	15.36530	34.8	5	0.0047
2	0.09090	15.54141	15.63231	35.5	5	0.0039
3	0.07871	15.95898	16.03769	36.4	5	0.0033
4	0.10501	14.82188	14.92689	33.9	5	0.0047

<b>No. varilla</b>	<b>Peso del TiO<sub>2</sub> G</b>	<b>Peso inicial de varilla g</b>	<b>Peso final de varilla g</b>	<b>Longitud de varilla cm</b>	<b>Diámetro de varilla mm</b>	<b>Espesor mm</b>
5	0.09250	15.39720	15.48970	35.2	5	0.0040
6	0.13433	15.37697	15.51130	35.1	5	0.0058
7	0.11036	15.70980	15.82016	35.9	5	0.0047
8	0.07178	13.04747	13.11925	29.8	5	0.0037
9	0.11500	15.26782	15.38282	34.9	5	0.0050
10	0.11745	15.57583	15.69328	35.6	5	0.0050
11	0.12139	15.53619	15.65758	35.5	5	0.0052
12	0.11181	15.38226	15.49407	35.1	5	0.0048
13	0.11527	14.87223	14.98750	34.0	5	0.0051
14	0.11445	15.85546	15.96991	36.2	5	0.0048
15	0.10963	15.42681	15.53644	35.2	5	0.0047
16	0.08666	15.72248	15.80914	35.9	5	0.0037
17	0.05091	15.49497	15.54588	35.4	5	0.0022
18	0.09874	15.82076	15.91950	36.1	5	0.0041
19	0.04091	15.49497	15.53588	35.4	5	0.0018
20	0.09877	20.94819	21.04696	33.2	6	0.0038
21	0.10965	20.30622	20.41587	32.2	6	0.0043
22	0.10557	20.93739	21.04296	33.2	6	0.0040
23	0.09732	20.11498	20.21230	31.9	6	0.0039
24	0.11116	20.67645	20.78761	32.8	6	0.0043
25	0.10989	20.70716	20.81705	32.8	6	0.0042
26	0.11140	20.26286	20.37426	32.1	6	0.0044
27	0.10997	20.75654	20.86651	32.9	6	0.0042
28	0.09131	17.17447	17.26578	39.2	5	0.0035
29	0.10522	19.92096	20.02618	31.6	6	0.0042
30	0.09134	14.36755	14.45889	32.8	5	0.0042
31	0.11363	20.39890	20.51253	32.4	6	0.0044
32	0.08685	17.02739	17.11424	38.9	5	0.0034
33	0.10105	20.98260	21.08365	33.3	6	0.0038
34	0.10342	19.04428	19.14770	30.2	6	0.0043
35	0.09431	17.84299	17.93730	28.3	6	0.0042
36	0.09630	15.08085	15.17715	34.4	5	0.0042
37	0.10495	20.23409	20.33904	32.1	6	0.0041
38	0.08581	14.01180	14.09761	32.0	5	0.0041
39	0.11552	20.75939	20.87491	32.9	6	0.0044
40	0.11745	15.58583	15.70328	35.6	5	0.0050

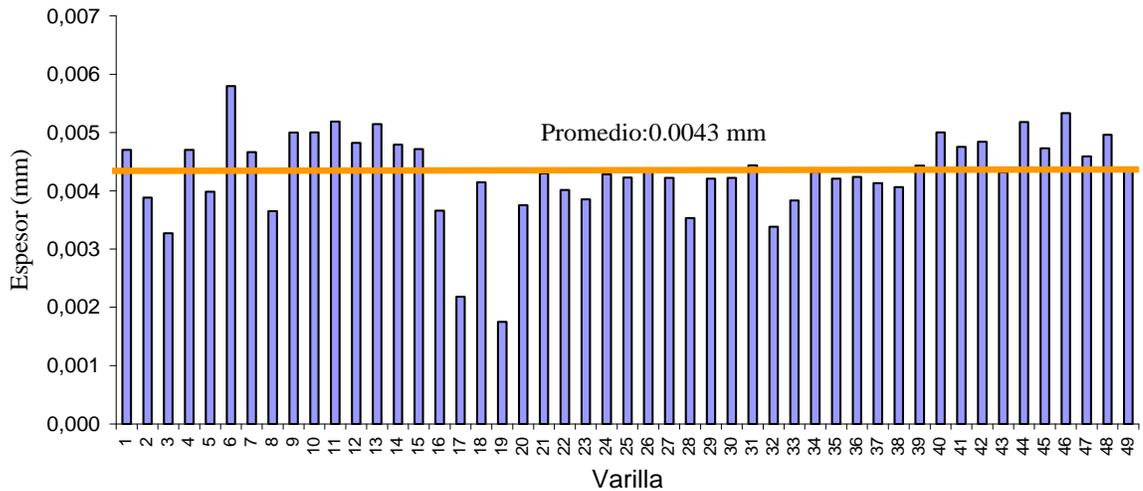
No. varilla	Peso del TiO <sub>2</sub> G	Peso inicial de varilla g	Peso final de varilla g	Longitud de varilla cm	Diámetro de varilla mm	Espesor mm
41	0.11139	15.54619	15.65758	35.5	5	0.0048
42	0.11291	15.48216	15.59507	35.4	5	0.0048
43	0.11051	20.37297	20.48348	32.3	6	0.0043
44	0.12139	15.55619	15.67758	35.5	5	0.0052
45	0.10966	15.39235	15.50201	35.2	5	0.0047
46	0.12041	14.98213	15.10254	34.2	5	0.0053
47	0.11037	15.96213	16.07250	36.5	5	0.0046
48	0.11689	15.63567	15.75256	35.7	5	0.0050
49	0.10367	15.81258	15.91625	36.1	5	0.0044



**Figura 4.1.** Varillas fijadas con dióxido de titanio inmovilizado.

Con base en los resultados obtenidos de la fijación de TiO<sub>2</sub> inmovilizado sobre las varillas de vidrio, se obtuvo un espesor promedio de TiO<sub>2</sub> de 0.0043 mm.

En la figura 4.2 se puede observar un gráfico con el espesor de dióxido de titanio fijado para las cuarenta y nueve varillas, es importante señalar que no hay una gran variación en el espesor, lo que confirma que el método Dip-Coating, es una alternativa viable para fijar dióxido de titanio a las varillas de vidrio.



**Figura 4.2.** Espesor de la capa de dióxido de titanio inmovilizado sobre varillas.

## 4.2 DESINFECCIÓN SOLAR CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE $TiO_2$

Después de tener las varillas fijadas con  $TiO_2$  se procedió a colocarlas en un reactor *batch* consistente de botellas de PET de 2.5 litros de volumen (Figura 4.3). A cada botella se le adicionó el agua en estudio (hasta tres cuartos de su capacidad) y se agitó vigorosamente. Posteriormente se completó su llenado con el agua y finalmente fueron expuestas al sol. Durante diferentes intervalos de tiempo se tomaron muestras de agua y se le determinó la temperatura, coliformes totales y coliformes fecales.



**Figura 4.3.** Reactor batch con varillas de vidrio fijadas con  $TiO_2$

Se utilizaron tres concentraciones diferentes de  $\text{TiO}_2$  : 0.2880, 0.5011 y 1.0073 mg/mL Los resultados promedio obtenidos de coliformes fecales y totales para cada una de las muestras se observan en los cuadros 4.2, 4.3 y 4.4. Cabe señalar que cada experimento se realizó por triplicado y sólo se muestran los resultados promedio.

Es importante destacar que la mitad de la botella fue pintada de negro para incrementar la intensidad de radiación del sol.

**Cuadro 4.2** Resultados promedio con concentración de 0.2880 mg/ml de dióxido de Titanio.

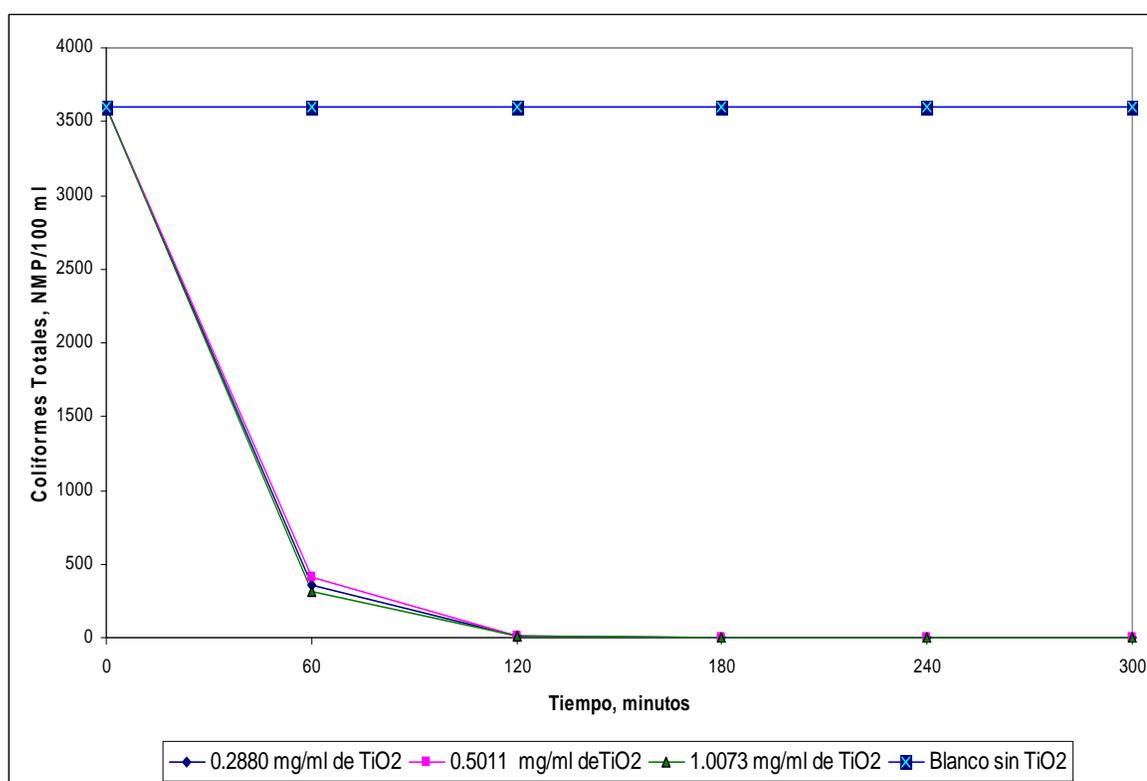
Tiempo de exposición al sol, minutos	Temperatura °C	SODIS/ $\text{TiO}_2$	
		Coliformes Totales NMP/100 ml	Coliformes Fecales NMP/100 ml
0 (Inicio)	24	3600	2200
60	36.6	360	220
120	41.3	10.1	6.9
180	43.3	<1.1	<1.1
240	45.2	<1.1	<1.1
300	46.3	<1.1	<1.1

**Cuadro 4.3** Resultados promedio con concentración de 0.5011 mg/ml de dióxido de Titanio

Tiempo de exposición al sol, minutos	Temperatura °C	SODIS/ $\text{TiO}_2$	
		Coliformes Totales NMP/100 ml	Coliformes Fecales NMP/100 ml
0 (Inicio)	24	3600	2200
60	36.5	410	110
120	41	10.1	5.1
180	43	<1.1	<1.1
240	45	<1.1	<1.1
300	46	<1.1	<1.1

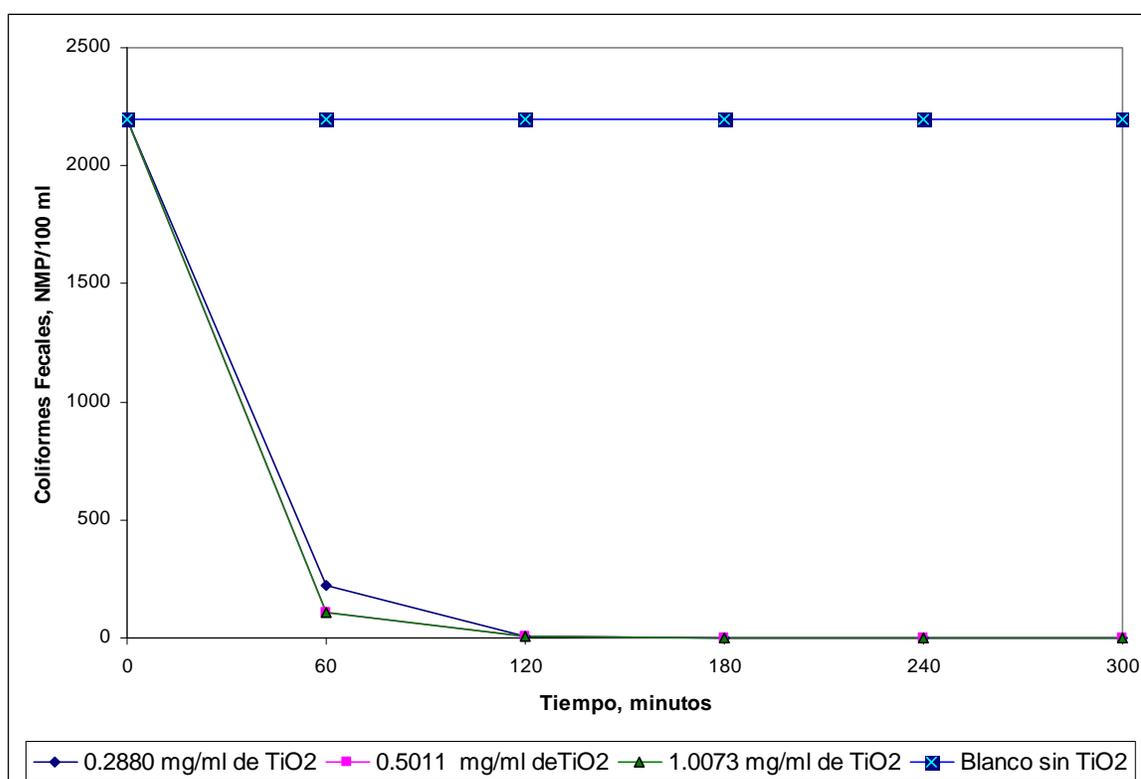
**Cuadro 4.4** Resultados con concentración de 1.0073 mg/ml de dióxido de Titanio

Tiempo de exposición al sol, minutos	Temperatura °C	SODIS/TiO <sub>2</sub>	
		Coliformes Totales NMP/100 ml	Coliformes Fecales NMP/100 ml
0(Inicio)	24	3600	2200
60	36.5	313	110
120	41	8.4	5.7
180	43	<1.1	<1.1
240	45	<1.1	<1.1
300	46	<1.1	<1.1



**Figura 4.4.** Inactivación de coliformes totales en función de la concentración de TiO<sub>2</sub>.

Con base en los resultados obtenidos se tiene que, muy independientemente de la concentración de dióxido de titanio utilizado y al tener el agua una temperatura por encima de 43°C en combinación con las varillas fijadas de dióxido de titanio, los coliformes totales y fecales ya tenían valores por debajo de 1.1 NMP/100 mL, con lo que se da cumplimiento a la normatividad mexicana: 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", respecto a la calidad microbiológica), que establece como límite máximo permisible; ausencia o no detectable



**Figura 4.5.** Inactivación de coliformes fecales en función de la concentración de  $\text{TiO}_2$ .

Los resultados mostrados en la figura 4.4 y 4.5, muestran claramente cómo disminuye la concentración de coliformes totales y fecales con respecto al tiempo. Para ambos casos, después de 120 minutos de exposición del reactor *batch* al sol, tanto coliformes fecales como totales están inactivados. Además, es importante remarcar que

independientemente de la concentración de  $\text{TiO}_2$  fijado en las varillas los resultados son muy similares.

### 4.3 COMPARACIÓN DE LA VELOCIDAD DE INACTIVACIÓN DE COLIFORMES TOTALES Y FECALES CON SODIS CONVENCIONAL Y SODIS/ $\text{TiO}_2$ .

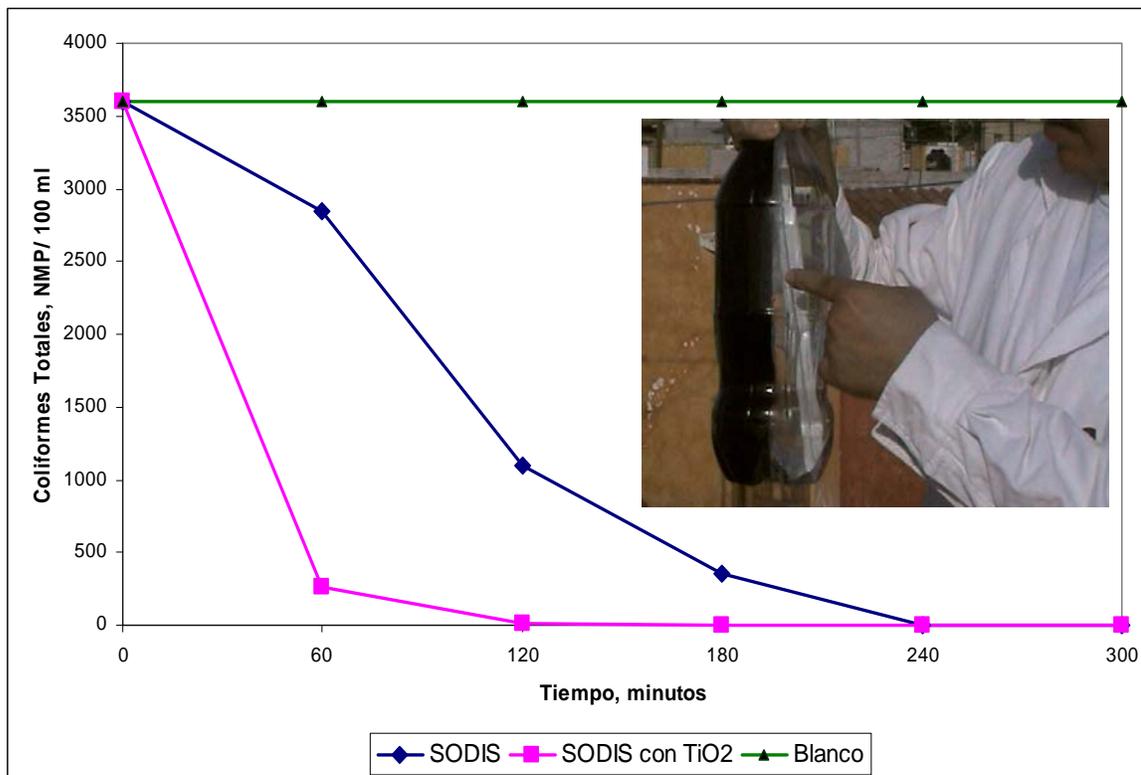
Después de haber experimentado diferentes concentraciones de  $\text{TiO}_2$  y observar que los resultados eran prácticamente los mismos, sin importar la concentración  $\text{TiO}_2$ , se procedió a determinar el tiempo de inactivación de coliformes totales y fecales con los métodos de SODIS convencional y SODIS/ $\text{TiO}_2$ , utilizando una concentración de  $\text{TiO}_2$  de 1 mg/mL de agua.

Es importante destacar que todos los resultados que se muestran son el promedio de todas las pruebas realizadas y esto se hace con el objetivo de poder interpretar los resultados y los cuadros y figuras sean los más claras y precisas.

**Cuadro 4.5** Resultados promedio del tiempo de inactivación de coliformes totales comparando los métodos: SODIS y SODIS/ $\text{TiO}_2$ .

Tiempo de exposición al sol, minutos	Temperatura °C	Coliformes Totales NMP/100 ml	
		SODIS	SODIS/ $\text{TiO}_2$
0 (Inicio)	23	3600	3600
60	37	2550	220
120	41	1100	9,2
180	42	360	<1.1
240	44	3,6	<1.1
300	45	<1.1	<1.1

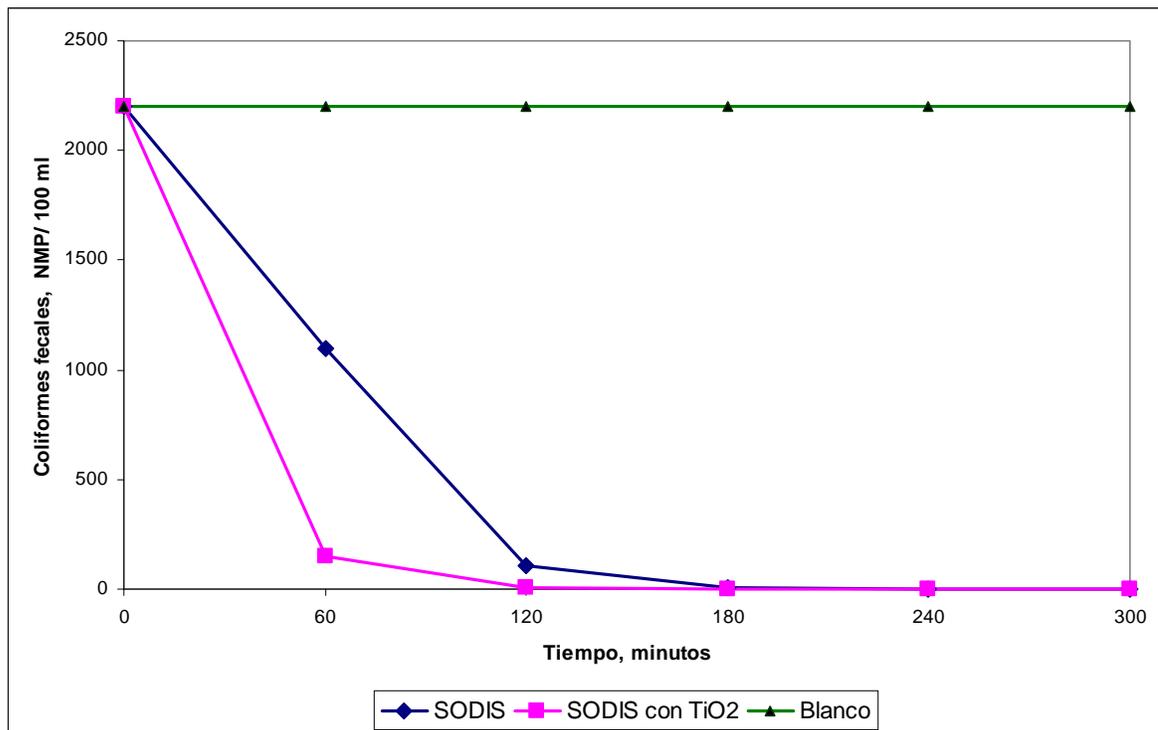
En la figura 4.6 se grafican los resultados del contenido de coliformes totales utilizando el método SODIS convencional y el método SODIS/ $\text{TiO}_2$ . Se puede observar que después de 180 minutos de exposición al sol, el método SODIS/ $\text{TiO}_2$  presenta coliformes totales < 1.1 NMP/100 mL y con ello se da cumplimiento a la normatividad mexicana.



**Figura 4.6.** Efecto de la inactivación de coliformes totales entre la comparación de la aplicación del método SODIS y SODIS/TiO<sub>2</sub>.

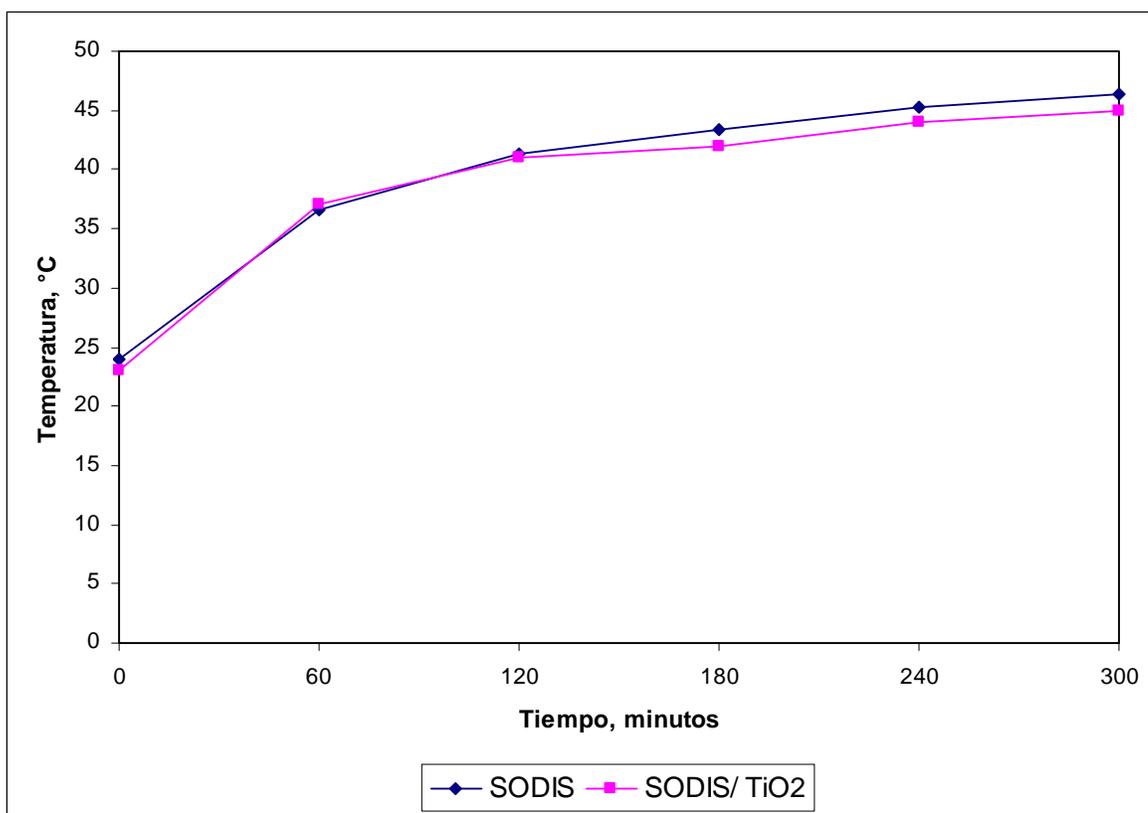
**Cuadro 4.6** Resultados promedio de la inactivación de coliformes fecales comparando los métodos: SODIS y SODIS/TiO<sub>2</sub>.

Tiempo de exposición al sol, minutos	Temperatura °C	Coliformes Fecales NMP/100 ml	
		SODIS	SODIS/TiO <sub>2</sub>
0 (Inicio)	23	2200	2200
60	37	1100	110
120	41	110	5,1
180	42	6,9	<1.1
240	44	<1.1	<1.1
300	45	<1.1	<1.1



**Figura 4.7.** Efecto de la inactivación de coliformes fecales entre la comparación de la aplicación del método SODIS y SODIS/TiO<sub>2</sub>.

En la cuadro 4.6 y figura 4.7 se observan los resultados de los coliformes fecales utilizando el método SODIS convencional y el método SODIS/TiO<sub>2</sub>. Se puede observar que después de 180 minutos de exposición al sol, el método SODIS/TiO<sub>2</sub> presenta coliformes fecales < 1.1 NMP/100 mL y con ello se da cumplimiento a la normatividad mexicana. Sin embargo se debe destacar que el método SODIS es funcional en la inactivación de coliformes totales y fecales, pero se requiere que la botella se exponga un mayor tiempo al sol, es decir un promedio de seis horas. Finalmente el dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) aumenta la velocidad de oxidación para la destrucción de microorganismos patógenos.



**Figura 4.8.** Variación de temperaturas realizadas en diferentes días para el método de SODIS y SODIS/TiO<sub>2</sub>.

Como se muestra en la figura 4.8 no hubo una gran variación de temperaturas, pero esto se debe a que todas las pruebas fueron realizadas durante los meses de junio y julio del 2005. Para verificar los resultados anteriormente mostrados se procedió hacer otras pruebas experimentales durante el mes de junio del 2006. Para ello se tomó la muestra de una comunidad de la ciudad de Querétaro, Cumbres del Conin, localizada a 20.57956° de latitud norte y 100.32333° de longitud oeste (figura 4.9) y a una altura de 2,042 metros sobre el nivel del mar. Esta comunidad esta aproximadamente a 10 kilómetros del centro de la ciudad de Querétaro y no cuenta con servicios de agua potable, canalización, ni luz eléctrica.

La toma de muestra se realizó con base en la NMX-AA-003-1980. La toma de muestra consistió en colocar en una botella de plástico (PET) 2,500 mililitros de agua. A cada muestra se le determinó inicialmente: pH, temperatura y coliformes totales. (Todos los

análisis físicos, químicos y biológicos se realizaron de acuerdo a los métodos de prueba de las normas mexicanas mencionadas anteriormente).



**Figura 4.9.** Comunidad Cumbres del Conin, localizada a  $20.57956^{\circ}$  de latitud norte y  $100.32333^{\circ}$  de longitud oeste

La comunidad de Cumbres del Conin, es una de las tantas colonias o comunidades que carecen de agua potable y alcantarillado en la ciudad de Querétaro. Lamentablemente, la gente que vive en este tipo de comunidades se abastece de agua por pipas y carecen de recursos suficientes para tener esta agua en condiciones higiénicas. Normalmente es colocada en tambos que no tienen tapaderas (muchos de ellos son metálicos y se encuentran parcialmente oxidados), como se muestra en la figura 4.10. A pesar de que los habitantes de la comunidad son informados respecto a que el agua de esta fuente no debe ser consumida, ya que se encuentra contaminada microbiológicamente (como se ha podido

comprobar por análisis en el laboratorio) muchas veces la situación económica en la que viven los lleva a utilizarla.

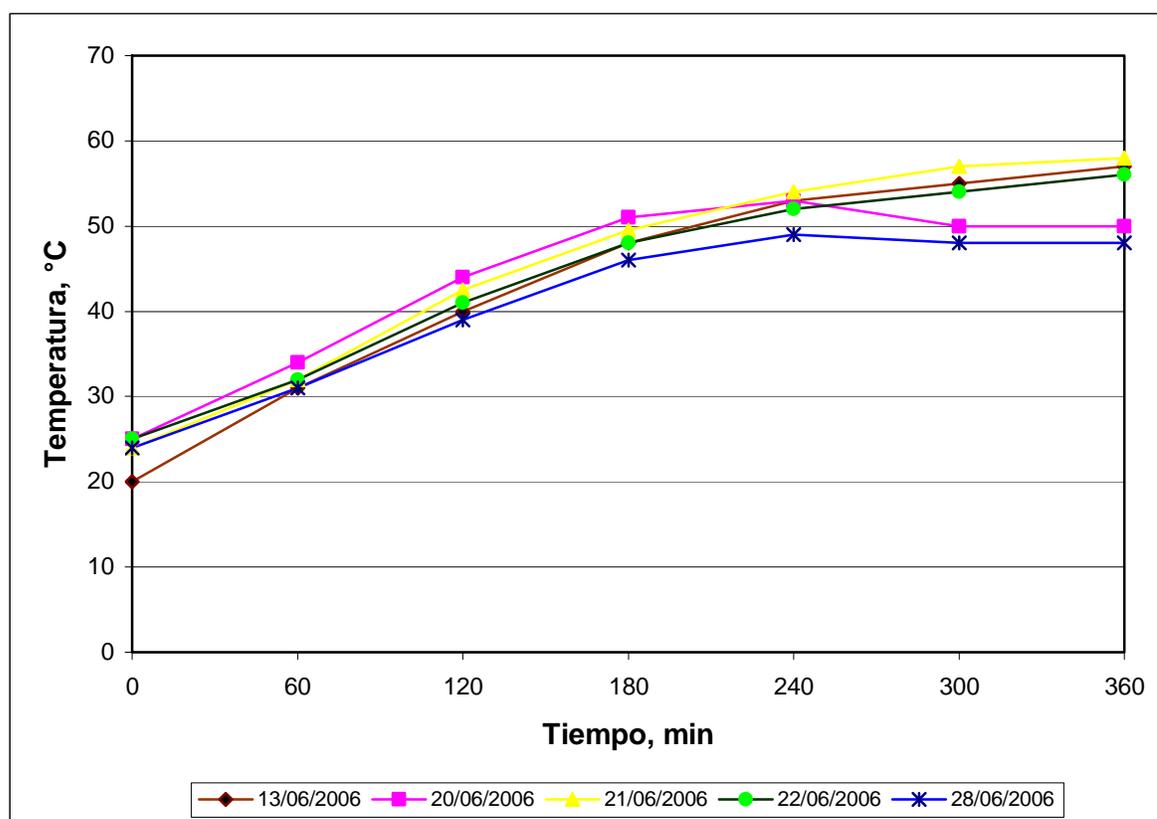
Esta investigación pretende dar una alternativa para desinfectar el agua a nivel domiciliario a comunidades como Colinas del Conin, que no tienen recursos para sistemas de desinfección sofisticados y costosos. El método SODIS es un método muy eficiente para desinfectar el agua y su combinación con dióxido de titanio pretende disminuir el tiempo de exposición al sol.



**Figura 4.10.** Recipientes donde depositan y almacenan el agua de pipas

Se tomaron varias muestras de agua de la comunidad Colinas del Conin, y a cada una de ellas se les determinó temperatura, pH y coliformes totales. Posteriormente fueron colocadas en el reactor *batch* y expuestas al sol, cada 60 minutos se tomaba una muestra y se le determinaba la temperatura y coliformes totales. El pH se mantuvo entre 6.5 y 7, estos valores están dentro de los límites que marca la norma oficial mexicana: NOM-127-SSA1-1994.

En la figura 4.11 se muestra cómo se incrementó la temperatura con respecto al tiempo. Los resultados presentan un incremento de la temperatura en promedio de 22.8°C, teniendo como temperatura máxima promedio 53.8°C y una temperatura mínima promedio de 23.6°C.



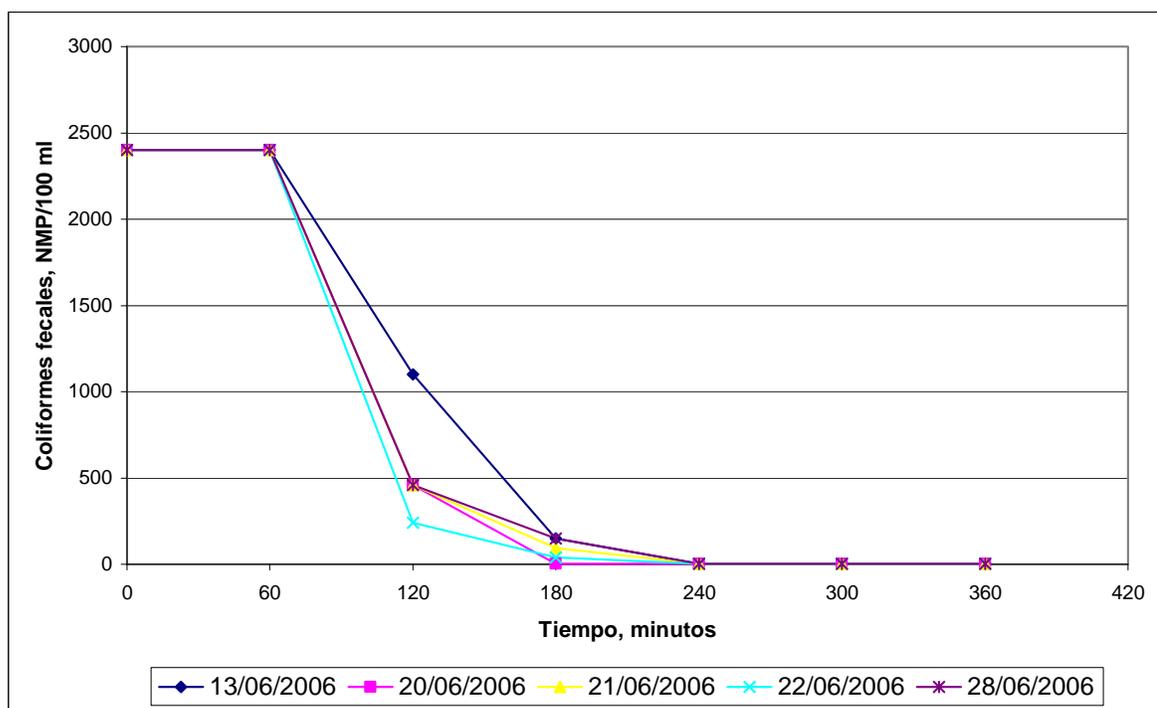
**Figura 4.11.** Temperatura adquirida por el agua dentro del reactor *batch*

En la figura 4.12 muestra el efecto de la inactivación de coliformes totales con respecto al tiempo, se puede observar que la muestra presentó constantemente una cantidad

de coliformes totales igual a 2400 NMP/100ml (se analizaron los coliformes totales con respecto a la NMX-AA-42-1987: Determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales). Después de 180 minutos de exposición al sol se observa una disminución de coliformes totales aproximadamente del 96% y a los 240 minutos se tienen coliformes totales < 3 NMP/100 ml, y con ello se da cumplimiento a la normatividad mexicana: NOM-127-SSA1-1994.

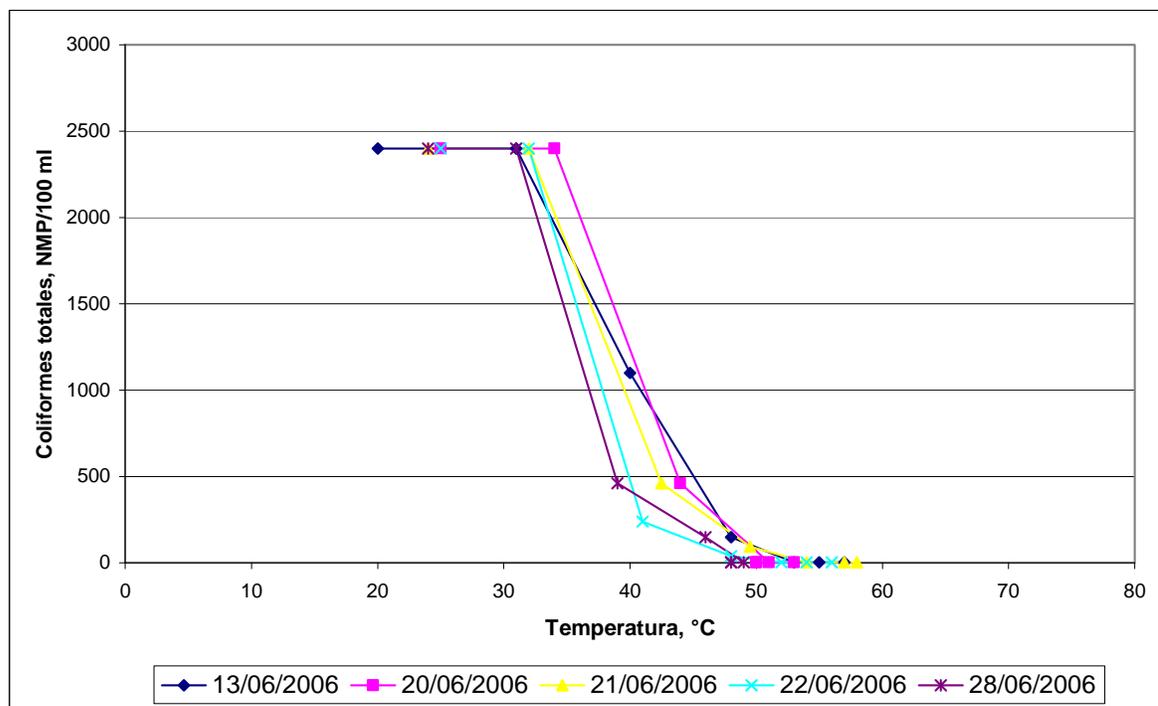
Comparando los resultados de la figura 4.12 con los resultados en el año 2005, podemos observar que son muy similares lo que nos puede asegurar que un tiempo de exposición de 240 minutos son suficientes para tener un agua libre de coliformes totales.

Con base en estos resultados podemos comprobar que la combinación del método SODIS tradicional con dióxido de titanio inmovilizado asegura una desinfección más rápida y segura.



**Figura 4.12** Efecto de la inactivación de coliformes totales con respecto al tiempo usando SODIS/TiO<sub>2</sub>

Después de ver el efecto de la inactivación de coliformes totales con respecto al tiempo, usando SODIS/TiO<sub>2</sub>, se procedió a verificar el efecto de inactivación de coliformes totales con respecto a la temperatura, los resultados se observan en la figura 4.13, donde se puede ver que a 50°C ya se tienen coliformes totales menores a 3 NMP/100 ml y con ello se asegura un cumplimiento de la normatividad mexicana: NOM-127-SSA1-1994.



**Figura 4.13.** Efecto de la inactivación de coliformes totales con respecto a la temperatura usando SODIS/TiO<sub>2</sub>

Los resultados mostrados en la figura 4.12 y 4.13 son de suma importancia porque un parámetro muy importante para llevar a cabo el proceso de desinfección SODIS en combinación con dióxido de titanio inmovilizado es que el cielo esté despejado y con presencia de sol y además que la muestra de agua debe de estar expuesta al sol durante un periodo mínimo de 4 horas y con ello se asegura un incremento de la temperatura a 50°C y como consecuencia la inactivación de los coliformes totales.

#### 4.4 RESULTADOS DEL RECRECIMIENTO DE COLIFORMES TOTALES EN EL PROCESO SODIS Y SODIS CON TiO<sub>2</sub>

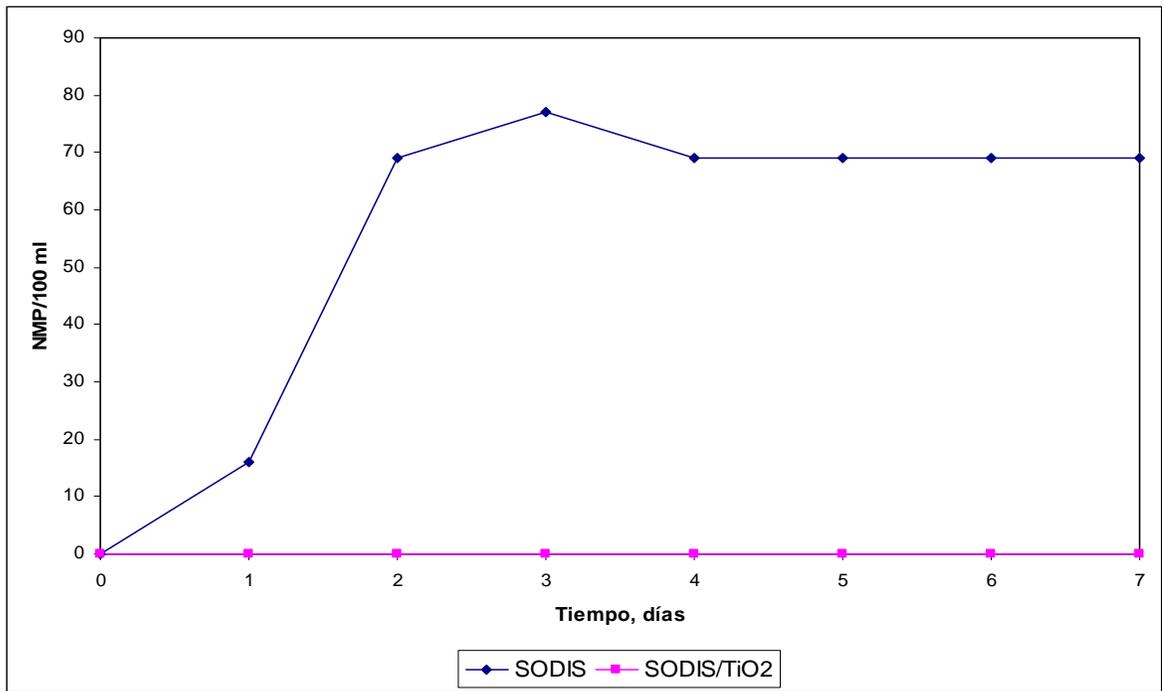
Una vez desinfectada el agua, se determinaron coliformes totales, a diferentes intervalos de tiempos para observar posible recrecimiento de microorganismos. Lo anterior se hizo con la finalidad de determinar el tiempo recomendado para consumir el agua después de desinfectarla. La primera muestra se tomó después de 24 horas de la desinfección, la segunda después de 48 h. y así sucesivamente se monitoreó durante siete días. Los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 4.7.

**Cuadro 4.7** Resultados del recrecimiento de coliformes totales promedio entre SODIS y SODIS/TiO<sub>2</sub>.

Tiempo Días	SODIS	SODIS/TiO <sub>2</sub>
	Coliformes Totales NMP/100 ml	Coliformes Totales NMP/100 ml
INICIO	0	0
1	16,1	0
2	69	0
3	69	0
4	69	0
5	69	0
6	69	0

Los resultados presentados en la figura 4.14 demuestran que el método de SODIS con TiO<sub>2</sub> mantiene por siete días el agua en condiciones aptas para consumo humano y en cambio el uso del método de SODIS tradicional presentó un recrecimiento de coliformes, con 5 horas de tratamiento, por lo que se recomienda hacerlo por seis o más horas para evitar este efecto.

Finalmente todos los análisis realizados y los resultados obtenidos, nos llevan a concluir que la combinación del método SODIS con dióxido de titanio inmovilizado acelera el proceso de desinfección del agua y con ello se asegura el cumplimiento de la normatividad mexicana y una alternativa viable de desinfección del agua.



**Figura 4.14.** Determinación de recrecimiento de coliformes fecales entre SODIS y SODIS/TiO<sub>2</sub>

## CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Al aplicar el método Coating, para cubrir las varillas con  $\text{TiO}_2$ , se obtuvo uniformidad en el espesor (un promedio de 0.0043 mm) en doce repeticiones de la impregnación de varillas.
- Al utilizar las varillas con diferentes concentraciones de  $\text{TiO}_2$  (0.288, 0.5011 y 1.0073 mg/mL), el proceso de desinfección es el mismo, ya que después de dos horas de exposición al sol el resultado en coliformes totales y fecales es menor a 1.1 NMP /100 mL.
- Al comparar el efecto de utilizar SODIS y SODIS con  $\text{TiO}_2$ , se concluye que, al utilizar el foto-catalizador, el proceso de desinfección es más eficiente que el SODIS convencional. La inactivación de coliformes fecales y totales, con SODIS tradicional requiere de un periodo de exposición al sol de más de cinco horas, mientras que para el método SODIS con  $\text{TiO}_2$  con cuatro horas es suficiente para asegurar una inactivación total de coliformes totales y fecales..
- Utilizar SODIS con  $\text{TiO}_2$  también garantiza que cuando se almacena el agua por un periodo de siete días no hay recrecimiento de coliformes totales, como puede llegar a suceder con SODIS convencional.
- Es importante destacar que el método de SODIS en combinación con dióxido de titanio inmovilizado es un método de desinfección casero, donde se utilizan volúmenes de agua no mayores a 2500 mililitros.
- Para poder llevar a cabo el método SODIS en combinación con dióxido de titanio inmovilizado se debe de tener un cielo despejado y con presencia de sol.
- Para asegurar una desinfección adecuada, es importante que las botellas de plástico se coloquen en una posición inclinada y en un lugar que asegure una radiación de sol constante.

- Para el método de desinfección SODIS/TiO<sub>2</sub> se recomienda que se de inicio a las 9 de mañana ya que sin importar el mes del año, en promedio a esta hora ya hay un cielo despejado y con sol.
- Una recomendación más es que las botellas donde se lleve acabo la desinfección solar con dióxido de titanio inmovilizado deben de estar perfectamente limpias y no olvidar llenar a tres cuartos de la botella agitar durante un minuto y después rellenar con la misma agua, ya que la agitación incrementa el oxígeno disuelto en el agua y favorece el proceso de desinfección.
- Es recomendable que en estudios posteriores se analice el efecto de inactivación de coliformes totales en diferentes meses del año para corroborar los resultados presentados en esta investigación.
- Los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas nos llevan a concluir que al alcanzar el agua una temperatura de 50°C y mantenerse durante una hora, asegura un resultado de coliformes totales menor a 3 NMP/100 mL y con ello se da cumplimiento a la normatividad mexicana en el aspecto microbiológico.
- Es importe destacar que el dióxido de titanio no solamente favorece la inactivación de coliformes totales, sino además degrada compuestos orgánicos en el agua, por lo que, para estudios posteriores, se puede no solo desinfectar sino además eliminar otro tipo de contaminantes que puede tener el agua.
- Finalmente, todos los análisis realizados y los resultados obtenidos nos llevan a concluir que la combinación del método SODIS con dióxido de titanio inmovilizado acelera el proceso de desinfección del agua con lo que se asegura el cumplimiento de la normatividad mexicana: NOM-127-SSA1-1994, siendo entonces una alternativa viable para la desinfección del agua.

## CAPITULO VI. BIBLIOGRAFÍA

- Abuxapqui** F.J.J., Guadalupe de J. H.S., Miguel A. P. F., Mario R. H., Maria de luz R.V.(1995), Calidad bacteriológica del agua potable de la ciudad de Mérida, México, Salud Publica de México, Vol. 37, No. 3, pág.236-239.
- Acra** A., Raffoul Z., Karahagopian Y. (1984), Desinfección solar del agua potable, Departamento de la salud ambiental, Facultad de ciencia de la salud universidad americana de Beirut.
- Arboleda** Valencia J. (2000), Teoría y práctica de la purificación del agua, tercera edición, McGraw Hill,tomo 2, pág. 633-697.
- Artículo Enciclopedia Encarta** (1993-2004) Territorio y Recursos de la republica Mexicana.
- Augugliaro** V., A.Bianco.P., J. Cáceres V., E. García. L., A. Irico, V.Loddo, S. Malato R., G. Marci, L. Palmisano, E. Pramauro (2004),Photocatalytic oxidation of acetronitilo in aqueous suspension of titanium dioxide irradiated by sunlight, Advaces in Environmental Researh, 8; 329-335.
- Bekbölet** M. and Araz C. (1996) Inactivation of *Escherichia coli* by photocatalytic oxidation. Chemosphere. 32, 959-965.
- Blanco** J., Malato S., M.I. Maldonado, O. Fernández I., A. Campos (2000), Optimising solar photocatalytic mineralization of pesticides by adding inorganic oxidising species; application to the recycling of pesticide containers, Applied Catalysis B: Envirinmental ,28 ;163-174.
- Blanke** M. Daniel, Pin-Ching Maness, Zheng Huang, Edward J. Wolfrum, and Jie Huang (1999), Application of the photocatalytic chemistry of titanium dioxide to disinfection and the killing of cancer cells, Separation and Purification Methods,Volume 28(1) 1999, pp. 1-50.
- Carey** D. Walter, Soo-Voon Len and Brita Sheehan (2004), Development and Evaluation of Reflective Solar Disinfection Pouch for Treatment of Drinking Water, Applied and Enviromental Microbiology; 70:2545-2550.
- Cho** Min, Hyenmi Chung, Wonyong Choi, and Jeyong Yoon1 (2005), Different Inactivation Behaviors of MS-2 Phage and *Escherichia coli* in TiO<sub>2</sub> Photocatalytic Disinfection, APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY, Vol.71, 270-275.
- Comisión Nacional del Agua, CNA** (2004) Estadísticas del agua en México, segunda edición, Pág. 7-139.

- Díaz D. M. F.** (2002). Desinfección del agua con luz ultravioleta. México. Agua latinoamericana.
- Downes A.** and Blunt T. P. (1877) Researches on the effect of light upon bacteria and other organisms. Proc. Roy. Soc.28, 488-500.
- Edberg SC,** Rice EW, Karlin RJ, Allen MJ. (2000), Escherichia coli: the best biological drinking water indicator for public health protection, Symp Ser Soc Appl Microbiol. 2000(29):106S-116S.
- Egocheaga Y.L.** (2004).Una estrategia para la gestión de las aguas residuales domésticas: Haciendo más sostenible la protección de la salud en América latina y otras regiones en desarrollo. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Pág. 20
- EPA-Environmental Protection Agency** (1998). Advanced Photochemical Oxidation Processes Handbook, U.S. Office of Research and Development. U.S.Government Printing Office: Washington, DC; EPA/625/R-98/004.
- Fadhil M.** Salih (2003), Formulation of mathematical model to predict solar water disinfection, Water research;37:3921-3927.
- Fiendbo A. J.** Jorgensen, K. Nohr, h. Sorensen and Boisen (1998), descontamination of drinking water by direct heating in solar panels, Journal of Applied Microbiology: 85:441-447.
- Fujishima A ,** Honda K (1972), Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode Nature 37:238.
- Gao P.,** Wing H. C., Mark H., Chi K. C., Po L. Y. (2003), Photooxidation of a model pollutant in an oscillatory flow reactor with baffles, Chemical Engineering Science, 58;1013 – 1020.
- Guillard C.,** Jean D., Christine M., Joseph D., Sixto M., Julián B., Manuel M., Jean M. H.(2003), Solar efficiency of a new deposited titania photocatalyst: chlorophenol, pesticide and dye removal applications, Applied Catalysis B: Environmental 46 (2003) 319–332.
- Hermann M.J.,** Chantal G., Jean D., Corinne L., Sixto M., Julian B. (2002), New industrial titania photocatalysts for the solar detoxication of water containing various pollutants, Applied catalysis B: Environmental, 35;281-294.
- Herrera M. J.A.,** J.M. Doña Rodríguez, A. Viera Suárez, E. Tello Rendón, C. Valdés do Campo, J. Arana, J. Pérez Peña (2000), The photocatalytic disinfection of urban waste water, Chemosphere;41:323-327.
- INEGI,** (2004), Información Geográfica Nacional.

- INEGI**, Instituto nacional de estadística geográfica e informática, (2004), Estadísticas a propósito del día mundial del medio ambiente.
- Ireland** J.C., Valinierks, J., (1992), Rapid measurements of aqueous hydroxyl radicals concentration in steady-state HO\*, Flux system. *Chemosphere* 25, 383-396.
- Ireland** J.C., Petra Klostermann, Eugene W. rice, and Robert M. Clark (1993), Inactivation of *Escherichia coli* by Titanium Dioxide Photocatalytic Oxidation, *Applied and environmental microbiology*, 59:1668-1670.
- Isaac-Marquez** AP, Lezama-Davila CM, Ku-Segovia PP,(1994), Sanitary Quality of water supplies for human consumption in Campeche. *Salud Publica Mex.*; 36:655-661.
- Karen** L. Simpson and Keith P. Hayes (1997), Drinking water disinfection by-products: an Australian perspective. *Pergamon*; 32:1522-128.
- Kehoe** S.C., T.M. Joyce, P. Ibrahim, J.B. Gillespie, R.A. Shahar and K.G. Mcguigan, (2001), effects of agitation turbidity, Aluminium Foil Reflector and Container Volume on the Inactivation Efficiency of Batch-Process Solar Disinfectors, *Pergamon*; 35:1061-1065.
- Kim** G., Joseph R., Stephen Q. (2004), Photocatalytic Reaction: Designing a Waste Water Remediation Plant, UCSD (University of California, San Diego).
- Laurie** F. Caslake, Daniel J. Connolly, Vilas Menon, Catriona M. Duncanson, Ricardo rojas, and Javad Tavakoli (2003), Disinfection of contaminated water by Using Solar Irradiation. *Applied and Environmental Microbiology*; 70:1145-1150.
- Malato** S., Julian B, Christoph R., manuel I. M. (2000), Optimization of pre-industrial solar photocatalytic mineralization of commercial pesticides Application to pesticide container recycling, *Applied Catalysis B: Environmental* ,25 ;31-38.
- Malato** S., J. Blanco, J.Cáceres, A.R. Fernández A., A. Aguera, A. Rodríguez (2002), Photocatalytic treatment of water-soluble pesticides by photo-Fenton and TiO<sub>2</sub> using solar energy, *Catalysis today*, 76;209-220.
- Malato** S., Julián B., Alfonso V., Christoph R. (2002), Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale: an overview, *Applied Catalysis B: Environmental*, 37;1-15.
- Martín** A.D., Ma. Teresa A.H., Ignacio R. M.D., y Arturo G. H. (2004), Efficiency in the disinfection of water for human consumption in rural communities using solar radiation, *Solar energy* , In Press, Corrected Proof.

- Maskew** G. F. , John C.G., Daniel A.O.,(1987), Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales.México, Grupo Noriega editores,volumen 4, pág. 403-467.
- Matsunaga** T., R. Tomoda, T. Nakajima, H. Wake, (1985),FEMS Microbiol. Lett. 29, 211.
- McGuigan** G. K., Joyce T. M., Conroy R. M., Gillespiem J. B. and Elmore-Meegan M. (1998) Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles: characterizing the bacterial inactivation process, Journal of Applied Microbiology. 84, 1138-1148.
- Meierhofer** R y Wegelin M., (2002), Guía de aplicación para desinfección solar del agua;COSUDE,UNICEF y PAS. Pág. 01-90
- Metcalf** & Eddy, Inc.(1996), Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, Mc graw Hill, tercera edición, Volumen 1, pág. 369-402.
- Organización de las naciones unidas (ONU)**, (2000), Reporte completo de la declaración del milenio, capitulo 5, Un futuro sostenible, declaración 278, 279 y 281.
- Parra** S., S. Malato, C. Pulgarin (2002), New integrated photocatalytic-biological flow system using supported TiO<sub>2</sub> and fixed bacteria for themineralization of isoproturon, Applied Catalysis B: Environmental 36, 131–144.
- Pérez** M., Torrades F., García Hortal J. A., Doménech X., Peral J. (2002) Renoval Organic contaminants in paper pulp treatmen effluents Ander Fenton and photo-Fenton condicions, Appl. Catal. B: Environ, 36, pp 63-74.
- Pham** N. H., T. McDowell, E. Wilkins (1995), *J. Environ. Sci. Health. A30*; 627.
- PNUMA** (Programa de las Nacional Unidas para el Medio Ambiente) (2003), Resumen diario de informaciones ambientales de los principales medios nacionales, regionales y mundiales,preparado por la Unidad de Informaciones de la Oficina Regional para América Latina y el Caribe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Pág. 11.
- Rojas R.** (2002). Guía para la vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano. Lima. Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. División de Salud y Ambiente. Organización Panamericana de la Salud. Oficina Sanitaria Panamericana, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. Pág. 4.
- Romero** R.A. (2000), Calidad del agua, Alfaomega, Segunda edición, México. pág. 152-217.
- Saito** T., T. Iwase, J. Horis, T. Morioka (1992), *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.* 14; 369.

- Salih F.M.** (2003), Formulation of mathematical model to predict solar water disinfection, *Water Research*;37:3921-3927.
- Sánchez-Pérez HJ**, Vargas-Morales MG, Méndez-Sánchez JD,(2000), Bacteriological Quality of drinking water in areas of high levels of poverty in Chiapas, México , *Salud Publica Mex.*; 42:397-406.
- Sjogren J. C.**, R. A. Sierka (1994), *Appl. Environ. Microbiol.* 60; 344.
- Solsona F.**; Méndez J. P. (2002) Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS/CEPIS), Desinfección del agua.
- Sommer B.**, A. Mariño, Y. Solarte, M.L. Salas, C. Dierolf, C. Valiente, D. Mora, R. Reshsteinar, P. Setter, W. Wirojanagud, H. Ajarme, A. Anisan, and M. Wegelin., (1997), SODIS, an emerging water treatment process, *Aqua*, 46:137-137.
- Stevenson M.**, K. Bullock, W.-Y. Lin, K. Rajeshwar,(1997), *Res. Chem. Intermed.* 23, 311.
- Transito L. M.** (2003), Thesis:The design and evaluation of a continuous photocatalytic reactor utilizing titanium dioxide in thin films of mesoporous silica, Mississippi State University pág 1-125.
- Vidal A.**, M.A. Martín L.(2001), Inactivation of titanium dioxide by sulphur: photocatalytic degradation of Vapam, *Applied Catalysis B: Environmental*, 32; 1-9.
- Wegelin M.** Canonica S., Mcchser K., Flcischmann T., Pesaro F. and Metzler A. (1994) Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. *Aqua* 43, 154-169.
- WHO** (2001), Water for Health taking charge World Water Day Report, Cap. 4, Pág 22-23
- WHO** (2001), Water Health Report, Pág 1-169.

## LISTA DE SIMBOLOGÍA Y ABREVIATURAS

AOPs: Procesos de oxidación avanzada

CBA: Calidad Bacteriológica del Agua

CBA: Calidad Bacteriológica del agua

°C: grado Celsius

cm<sup>2</sup>: centímetros cuadrados

DQO: Demanda Química de Oxígeno

e<sub>cb</sub><sup>-</sup>: Electrón en la banda de conducción

g: gramos

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Peroxido de hidrogeno

h<sub>bv</sub><sup>+</sup>: Electrón excitado en la banda de valencia

HOBr: ácido hipobromoso

HOCl: ácido hipocloroso

hν: Energía

Kg: Kilogramo

μg/L: microgramos

mg: miligramos

mL: mililitro

mm: milímetros

mW: miliwatts

nd: No disponible

O<sub>2</sub>: Oxígeno

O<sub>3</sub>: Ozono

OMS: Organización Mundial de la Salud

$S_2O_8^{2-}$ : Peroxisulfato

SODIS: Desinfección solar

SPC: Subproductos de la cloración

SPD: Subproductos

THM's: Trihalometanos

$TiO_2$ : Dióxido de titanio

UNT: Unidades Nefelométricas de turbiedad

UV: Luz Ultravioleta

UVA: Luz ultravioleta en la región A