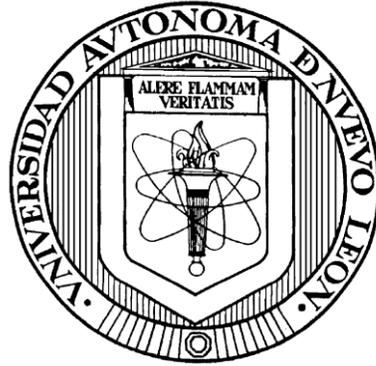


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**Energía Solar para la Inactivación de Microorganismos Presentes en Efluentes Contaminados**

**Por**

**RODOLFO ALEJANDRO GARCÍA ZAMBRANO**

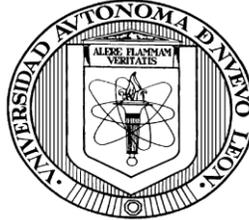
**Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**

**Diciembre, 2010**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**Energía Solar para la Inactivación de Microorganismos Presentes en Efluentes Contaminados**

**TESIS**

**Presentada como requisito parcial para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**

**POR**

**RODOLFO ALEJANDRO GARCÍA ZAMBRANO**

**APROBADA**

**COMISIÓN DE TESIS**

**Ph.D. JUAN ANTONIO VIDALES CONTRERAS**

**PRESIDENTE**

**Dr. Cs. HUMBERTO RODRÍGUEZ FUENTES**

**SECRETARIO**

**Dr. ERNESTO JAVIER SÁNCHEZ ALEJO**

**VOCAL**

**El presente trabajo se realizó en el Campus Marín y en el Laboratorio de Remediación Ambiental y Análisis de Aguas, Suelos y Plantas, de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León bajo la dirección del Ph.D. Juan Antonio Vidales Contreras.**

**Esta investigación fue apoyada por el programa de mejoramiento al profesorado (PROMEP) a través del proyecto ‘Unidad de Ecosistemas Construidos para Tratamiento de Aguas Residuales Municipales’ bajo la dirección del cuerpo académico de Ambiente y Sustentabilidad.**

## **DEDICATORIA**

**A mi esposa Erendida Yaneth Martínez López por el apoyo, confianza y su comprensión incondicional en este tiempo. Gracias por el amor y dedicación a nuestro hogar.**

**A mi hija Danna Yaneth García Martínez por permitirme disfrutar de tus sonrisas y encantos, gracias por esos momentos de enojo y de tu llorar cuando me retiraba de casa así como tu exigencia de darte tiempo. Motivos por el cual dieron fuerza y perseverancia a mi trabajo.**

**A mi madre Leticia Zambrano Martínez que cultivó a lo largo de mi vida el trabajo, dedicación y esfuerzo.**

**A mi padre Rodolfo García Ocañas por su apoyo y dedicación en todo momento.**

**Mis Hermanas, esposos e hijos quienes estuvieron brindándome su apoyo en el transcurso de mis estudios.**

**Al Ph.D. Juan Antonio Vidales Contreras.**

**Al M.C. Luis Samaniego Moreno.**

**Al Dr. Ernesto Javier Sánchez Alejo.**

**Al Dr. Humberto Rodríguez Fuentes.**

**Al Dr. Jesús Alfonso Fernández Delgado.**

**Al Lic. Carlos Sandoval Ramírez.**

**A María Teresa López Cruz.**

**A Juan Carlos Hernández Ortiz.**

**A mis maestros que impartieron las materias del área básica.**

**A los trabajadores de la FAUANL.**

**A mis compañeros de Doctorado, Maestría y Licenciatura que en su momento me apoyaron en la investigación.**

## Índice

<b>I</b>	<b>Índice de Figuras</b>	<b>vii</b>
<b>II</b>	<b>Índice de Tablas</b>	<b>viii</b>
<b>III</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>IV</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>3</b>
<b>V</b>	<b>Objetivos</b>	<b>3</b>
<b>VI</b>	<b>Revisión de Literatura</b>	<b>4</b>
<b>6.1</b>	<b>Disponibilidad del agua a nivel mundial</b>	<b>4</b>
<b>6.2</b>	<b>Disponibilidad del agua en México</b>	<b>4</b>
<b>6.3</b>	<b>Cobertura de agua potable</b>	<b>5</b>
<b>6.4</b>	<b>Índice de enfermedades infecciosas del aparato digestivo</b>	<b>8</b>
<b>6.5</b>	<b>Desinfección térmica</b>	<b>12</b>
<b>6.6</b>	<b>Radiación solar</b>	<b>15</b>
<b>6.7</b>	<b>Antecedentes de colectores solares</b>	<b>16</b>
<b>6.8</b>	<b>Tipología de colectores solares</b>	<b>20</b>
<b>6.8.1</b>	<b>Colectores planos</b>	<b>20</b>
<b>6.8.2</b>	<b>Colectores al vacío</b>	<b>20</b>
<b>6.8.3</b>	<b>Concentradores de disco parabólico</b>	<b>21</b>
<b>6.8.4</b>	<b>Concentradores de canal parabólico</b>	<b>22</b>
<b>6.8.5</b>	<b>Sistemas de torre central</b>	<b>22</b>
<b>VII</b>	<b>Materiales y Métodos</b>	<b>22</b>
<b>7.1</b>	<b>Área de trabajo</b>	<b>22</b>
<b>7.2</b>	<b>Construcción del concentrador solar tipo parabólico</b>	<b>23</b>

<b>7.3</b>	<b>Transferencia de energía</b>	<b>25</b>
<b>7.4</b>	<b>Ley de enfriamiento de Newton</b>	<b>26</b>
<b>7.5</b>	<b>Obtención de bacterias y virus</b>	<b>27</b>
<b>7.6</b>	<b>Replicación de bacterias y virus</b>	<b>27</b>
<b>7.8</b>	<b>Sitio de muestreo en los pantanos artificiales</b>	<b>29</b>
<b>7.9</b>	<b>Pruebas de desinfección y muestreo</b>	<b>30</b>
<b>7.10</b>	<b><i>Escherichia coli</i> 15597</b>	<b>31</b>
<b>7.11</b>	<b>Virus PRD1</b>	<b>32</b>
<b>7.12</b>	<b>Desinfección y muestreo en pantanos artificiales</b>	<b>32</b>
<b>VIII</b>	<b>Resultados y Discusión</b>	<b>33</b>
<b>IX</b>	<b>Conclusión</b>	<b>41</b>
<b>X</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>42</b>

## I.-Índice de Figuras

Figura 1.-	Variación de la disponibilidad natural media del agua per cápita ( $\text{m}^3/\text{hab}/\text{año}$ ), de 1950 a 2005 según CONAGUA, 2010.	5
Figura 2.-	Tasa de mortalidad por enfermedades diarreicas observada por 100 mil habitantes menores de 5 años.	7
Figura 3.-	Tiempo de reducción decimal por calor.	14
Figura 4.-	Concentrador solar cilíndrico, según Zhifeng <i>et al.</i> , 2010.	17
Figura 5.-	Concentradores solares parabólicos, según Zhifeng <i>et al.</i> , 2010.	18
Figura 6.-	Concentrador solar parabólico, según Zhifeng <i>et al.</i> , 2010.	18
Figura 7.-	Recubrimiento de la parábola con acero inoxidable y papel poliéster.	23
Figura 8.-	Serpentín de cobre para la desinfección del agua.	24
Figura 9.-	Concentrador solar tipo parabólico con flujo por gravedad para la desinfección del agua.	25
Figura 10.-	Estimación de horas luz que se reciben anualmente en Nuevo León México.	34
Figura 11.-	Remoción de <i>E. coli</i> 15597 (o), PRD1 ( $\Delta$ ) y Bacteriófagos nativos PE ( $\square$ ), PS ( $\diamond$ ).	37
Figura 12.-	Remoción de bacteriófagos nativos; ( $\Delta$ ) PE <sub>r</sub> ; ( $\diamond$ ) PS <sub>r</sub>	37
Figura 13.-	Curva de simulación del modelo de enfriamiento de Newton.	38

## II.-Índice de Cuadros

Cuadro 1.-	Municipios con mayor rezago social hasta el 2005 (CONAGUA, 2010)	6
Cuadro 2a.-	Casos registrados de enfermedades infecciosas del aparato digestivo, 2002-2008, según CONAGUA (2010).	9
Cuadro 2b.-	Casos registrados de enfermedades infecciosas del aparato digestivo, 2002-2008, según CONAGUA (2010).	
Cuadro 3.-	Tiempo de control térmico para algunos microorganismos.	15
Cuadro 4.-	Concentración de inyección de los microorganismos indicadores.	30
Cuadro 5.-	Tiempos de residencia para la inactivación de diferentes microorganismos presentes en agua mediante la utilización de energía solar,10 de Julio del 2009.	31
Cuadro 6.-	Tiempos de residencia para la remoción de diferentes microorganismos presentes en agua mediante la utilización de energía solar. 03 de Noviembre del 2010.	31
Cuadro 7.-	Temperatura del agua alcanzada en función de los tiempos de residencia; 10 de Julio 2009.	35
Cuadro 8.-	Temperatura del agua alcanzada en función de los tiempos de residencia, 3 de Noviembre 2010.	35
Cuadro 9.-	Tiempo de reducción decimal para la remoción de microorganismos indicadores.	39

### III.- Introducción

Las enfermedades diarreicas a nivel mundial, son la principal causa de muerte en infantes menores de 5 años en países en desarrollo. Aproximadamente en el año 2003 murieron 1,870,000 niños por motivos diarreicos. Algunos de los microorganismos causantes de diarrea son las bacterias y virus entéricos. Entre las bacterias se puede encontrar a *Salmonella* que ocasiona del 1 al 5 % de casos de gastroenteritis y *Escherichia coli* causante del 25 % de los casos de diarrea, transmitiéndose a través de alimentos y agua contaminada. Asimismo en el caso de los virus entéricos se encuentra el rotavirus, causante del 15 a 25 % de casos diarreicos en niños de 6 a 25 meses de edad. En México las enfermedades intestinales infecciosas causaron 5,479,179 episodios en el 2008 con una tasa de morbilidad de 5,136 muertes por cada 100,000 habitantes. Por lo anterior tanto el abastecimiento de agua potable como el tratamiento de agua residual, es de gran importancia para disminuir los brotes de enfermedades causadas por la ingestión de agua o alimentos contaminados. Para prevenir que los cuerpos hídricos superficiales se contaminen, el país cuenta con 1,833 plantas en operación formal, tratando un caudal de 83, 639.6 L seg<sup>-1</sup>. Es importante mencionar que en el año 2008, 604 plantas potabilizadoras municipales con una capacidad instalada de 130,877.8 L seg<sup>-1</sup> y 87, 310 L seg<sup>-1</sup> de caudal potabilizado (CONAGUA, 2009) estuvieron en funcionamiento en México en un esfuerzo de proteger la salud pública de enfermedades entéricas. Sin embargo, existen comunidades que por su situación geográfica es difícil que alcancen estas medidas de saneamiento. En estas comunidades es necesario implementar sistemas de tratamiento de fácil implementación y eficaces en la reducción de patógenos entéricos utilizando fuentes de energía accesibles y económicas.

Recientemente en México, se han efectuado investigaciones para la desinfección del agua para consumo humano utilizando energía solar. Las pruebas de desinfección se efectúan colocando las muestras de agua en botellas de PET, con exposición directa al sol por más de 8 horas, para la inactivación de coliformes totales (CT) y *E coli*, se han alcanzado hasta el 100 % de desinfección (Martín-Domínguez, *et al.*, 2004; Méndez-Hermida, *et al.*, 2005; Boyle., *et al.*, 2008; Barney *et al.*, 2006; Bosshard *et al.*, 2009; Dejung *et al.*, 2007).

En el presente trabajo de investigación se construyó y se evaluó un concentrador solar de tipo parabólico para desinfectar o reducir la carga microbial de efluentes contaminados. Los resultados obtenidos mostraron que los niveles de desinfección para virus y bacterias entéricas pueden ser superiores al 90% con tiempos de residencia de 7.3 min en un serpentín de cobre colocado en el foco de la parábola. Los resultados sugieren que este sistema resulta ser una tecnología efectiva, económica, de fácil construcción, y mínimo mantenimiento para la desinfección del agua.

#### **IV.-Hipótesis**

Es posible inactivar la carga microbiana de efluentes contaminados a través de un concentrador solar tipo parabólico.

#### **V.-Objetivos**

El presente trabajo tiene por objetivo aplicar la energía solar para la inactivación de microorganismos presentes en efluentes contaminados por medio de un concentrador solar.

##### **Objetivos específicos:**

1. Diseñar, construir y operar un concentrador solar tipo parabólico.
2. Inactivar por medio de un concentrador solar *Escherichia coli* 15597, y PRD1 virus modelo presentes o inoculados.
3. Mediante un concentrador solar remover coliformes fecales, coliformes totales y bacteriófagos nativos en muestras de agua obtenidas de pantanos artificiales.

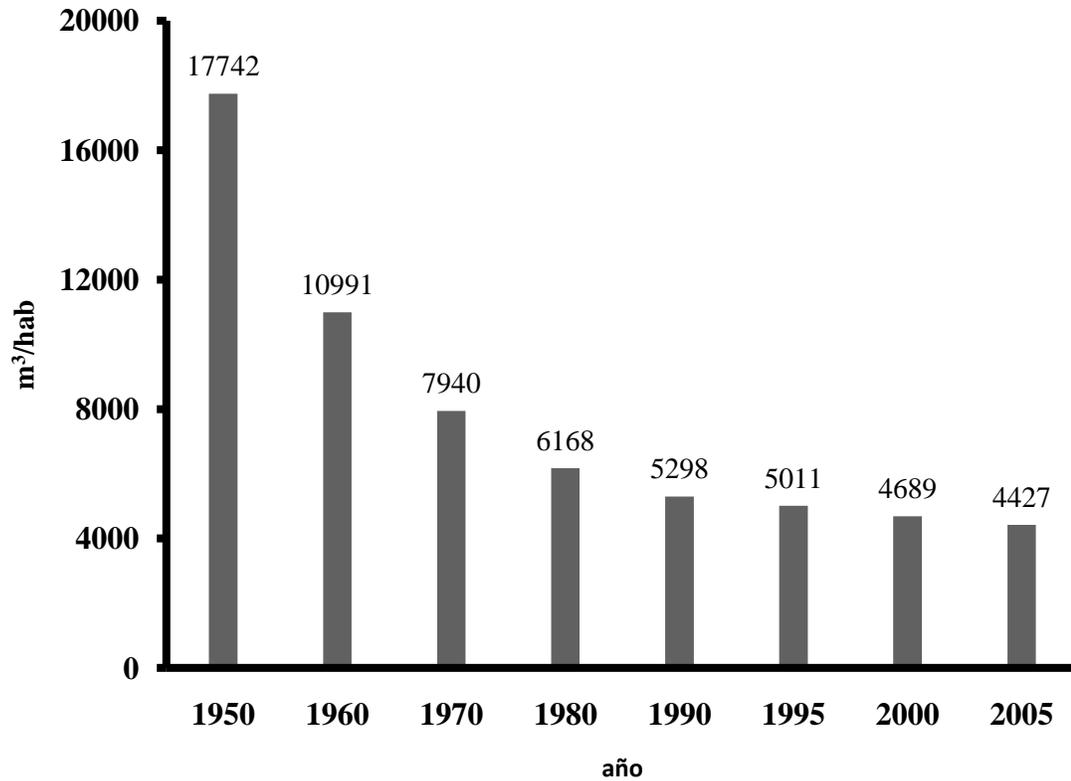
## **VI.-Revisión de literatura**

### **6.1 Disponibilidad del agua a nivel mundial.**

La disponibilidad anual de agua a nivel mundial, es aproximadamente 1,386 millones de kilómetros cúbicos. Por su salinidad, su distribución es 97.5 % salada y 2.5 % agua dulce. Del 100 % de agua dulce, 69.6 % ( $24 \times 10^7 \text{ km}^3$ ) se encuentra en glaciales, hielo y nieve, 30 % ( $1.5 \times 10^7 \text{ km}^3$ ) es de agua subterránea y solo el 0.4 % está disponible para consumo humano, encontrándose en el suelo y pozos pocos profundos acumulando  $135,000 \text{ km}^3$  (CONAGUA, 2010).

### **6.2 Disponibilidad de agua en México.**

Anualmente México recibe 1,488 miles de millones de metros cúbicos de agua derivada de la precipitación de los cuales 72.5 % evapotranspira y regresa a la atmósfera, 25.4 % escurre por los ríos y 2.1 % fluye por el subsuelo recargando los acuíferos, de esta manera el país cuenta con 458 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable disponible (Figura 1). Su utilización se distribuye en 5 % para termoeléctricas, 4 % en la industria autoabastecida, 14 % en abastecimiento público y 77 % para uso agrícola (CONAGUA, 2010).



**Figura 1.- Variación de la disponibilidad natural media del agua per cápita (m<sup>3</sup>/hab/año) 1950 a 2005, según CONAGUA, 2010.**

### **6.3 Cobertura de agua potable.**

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), considera que la cobertura de agua potable incluye a las personas que tienen agua entubada dentro de la vivienda, no necesariamente con calidad potable. De acuerdo con lo anterior el 89.2 % de la población tenía cobertura de agua potable en el año 2005 y para el 2007 la cobertura fue del 89.9 %. Asimismo, considera que la cobertura del alcantarillado incluye a personas que tienen conexión a la red, o bien al desagüe, a una barranca, grieta, lago o mar. Se estima que en el año del 2005 el 85.6 % de la población tenía cobertura de alcantarillado y en el 2007 la cobertura fue del 86.1 %.

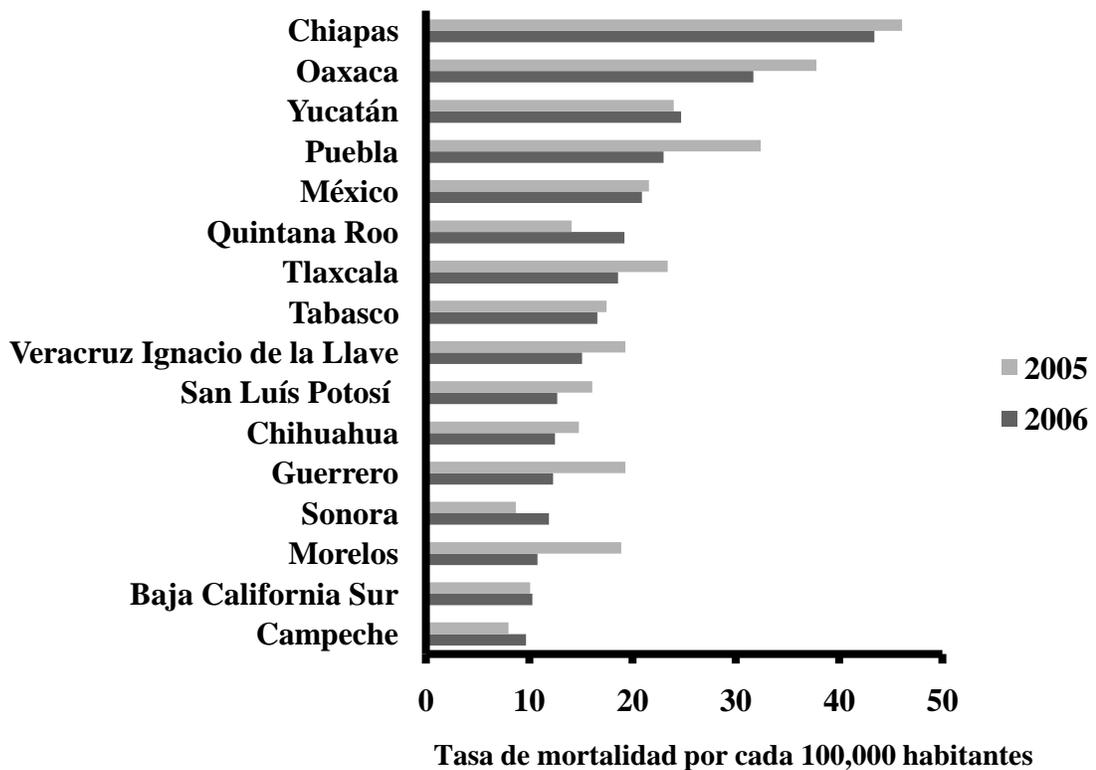
Para pequeñas localidades de menos de 100 habitantes, aproximadamente el 10 % de la población no cuenta con sistemas de alcantarillado ni abastecimiento de agua potable ya que en el sector rural debido a sus condiciones geográficas es muy costoso dotar de estos servicios (Thurman *et al.*, 1998). Los municipios con mayor rezago social, se muestran en la Cuadro 1 (CONAGUA 2010).

**Cuadro 1.- Municipios con mayor rezago social, 2005, según CONAGUA, 2010.**

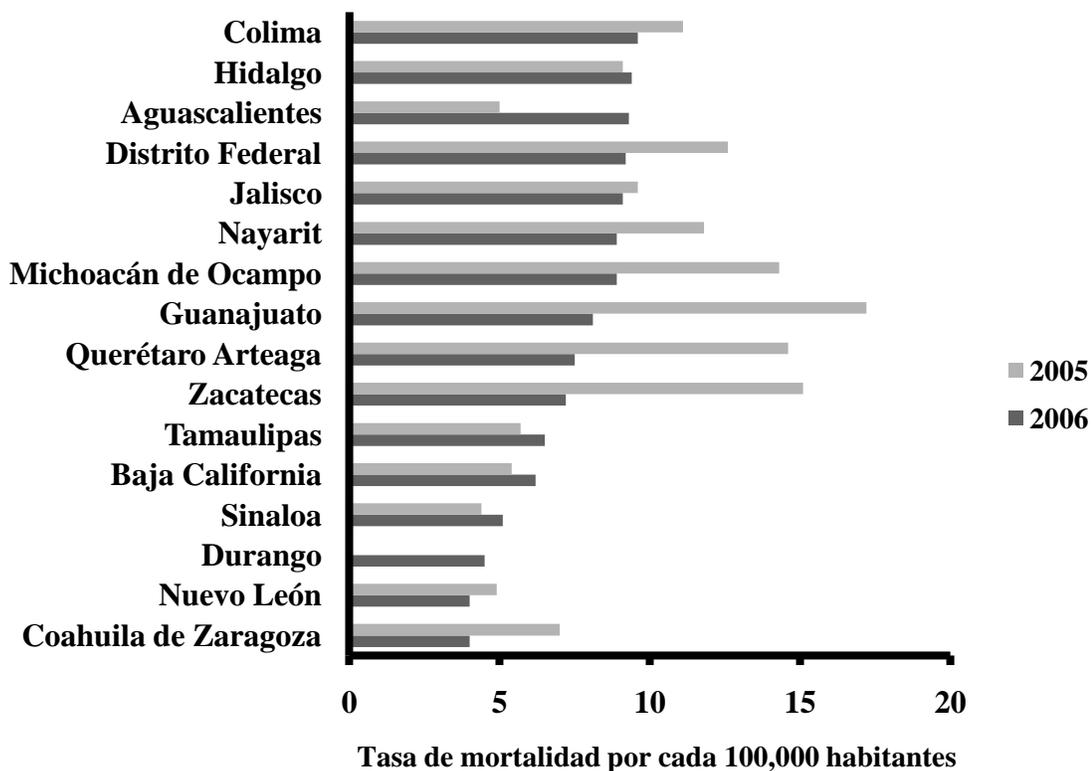
Lugar de rezago	Municipio	Población	Cobertura de agua potable %	Cobertura de drenaje %	*Altitud (msnm)
1	Cochoapa el Grande, Guerrero	15,572	40.9	0.5	1,020
2	Batopilas, Chihuahua	13,298	28.8	13.8	570
3	Coicoyán de las Flores, Oaxaca	7,598	68.2	7.9	1,920
4	Sitalá, Chiapas	10,246	40.7	16.4	1,100
5	Del Nayar, Nayarit	30,551	44.7	14.3	420
6	Acatepec, Guerrero	28,525	28.4	4.7	1,765
7	Metlatónoc, Guerrero	17,398	64.9	0.9	2,020
8	San Juan Petlapa, Oaxaca	2,717	39.2	0.3	720
9	José Joaquín de Herrera, Guerrero	14,424	56.6	16.7	1,640
10	Chalchihuitán Chiapas	13,295	32.2	2.4	1,400
11	Tehuipango, Veracruz de Ignacio de la Llave	20,406	31.6	1.3	2,260
12	Mixtla de Altamirano, Veracruz de Ignacio de la Llave	9,572	26.9	42.7	1,650
13	Santiago Amoltepec, Oaxaca	11,113	12.8	0.2	1,720
14	San José Tenango, Oaxaca	18,120	8.7	11.7	762
15	Santa Lucía Miahuatlán, Oaxaca	3,023	68.1	1.1	2,010
16	Copanatoyac, Guerrero	17,337	62.8	3.2	1,370
17	San Martín Peras, Oaxaca	12,406	79.0	6.7	2,020
18	Santa Cruz Zenzontepec, Oaxaca	16,773	8.1	3.7	963
19	Santiago el Pinar, Chiapas	2,854	59.1	17.5	1,680
20	Mitontic, Chiapas	9,042	33.2	26.2	1,820

\*msnm.- metros sobre el nivel del mar.

Como consecuencia de la falta de abastecimiento de agua potable, alcantarillado y tratamiento de agua residual, los brotes de enfermedades gastrointestinales son frecuentes, siendo la población infantil la más susceptible de padecimientos relacionados con la mala calidad del agua (Moser y Hans-Joachim, 2008). La tasa de mortalidad por enfermedades diarreicas, observada por 100 mil habitantes menores de 5 años, para los años 2005 y 2006 se muestra en la Figura 2.



**Figura 2 a.- Tasa de mortalidad por enfermedades diarreicas, observada por 100 mil habitantes menores de 5 años, según CONAGUA.**



**Figura 2 b.- Tasa de mortalidad por enfermedades diarreicas, observada por 100 mil habitantes menores de 5 años, según CONAGUA.**

#### **6.4 Índice de enfermedades infecciosas del aparato digestivo.**

Los agentes causales de enfermedades entéricas transmitidos por agua son bacterias, virus, protozoarios y helmintos que infectan el aparato digestivo del ser humano (Smith *et al.*, 2000; Shehane *et al.*, 2005). Entre los patógenos de gran impacto en la salud pública se encuentran *Salmonella* spp, *E. coli*, *Vibrio cholerae*, huevos de Helmintos, así como también virus entéricos, por ejemplo, poliovirus, hepatitis A, rotavirus y adenovirus (HAdV-F), causantes de diversas infecciones entéricas, que bajo determinadas condiciones llegan a provocar la muerte del individuo, siendo los infantes menores de 5 años los más susceptibles alcanzando una tasa anual de 2.2 millones de

muertes en países en desarrollo (Jensen *et al.*, 2004; Graf *et al.*, 2008). En el Cuadro 2 se encuentran los casos registrados de las enfermedades infecciosas del aparato digestivo en México para el periodo 2002-2008 (CONAGUA, 2009).

**Cuadro 2.- Casos registrados de enfermedades infecciosas del aparato digestivo.**

	Número de casos por año						
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
*I	6,831,630	6,191,011	5,951,869	5,912,952	5,765,081	5,533,670	5,479,179
*II	31,473	27,704	22,321	19,441	16,483	14,799	12,777
*III	7,889	20,020	25,952	31,790	37,012	44,076	44,819
*IV	80,494	102,754	109,444	109,536	115,014	122,956	119,776
*V	5,374,980	4,823,611	4,778,135	4,765,567	4,716,011	4,616,080	4,626,445
*VI	21,659	36,057	39,947	40,599	37,987	36,121	36,769

\*I infecciosas intestinales, II *shigelosis*, III fiebre tifoidea, IV paratifoidea y otras salmonelosis, V por virus y otros organismos y VI intoxicación alimentaria bacteriana. 2002-2008. Según CONAGUA.

El grado de infección depende de la virulencia y capacidad de infección de cada microorganismo y la inmunología del hospedero (Bitton G, 1994).

Para *E. coli* la mínima dosis infecciosa es de  $10^6$  a  $10^8$  unidades formadoras de colonias (UFC) en alimentos o agua contaminada. Este microorganismo es un bacilo Gram negativo, anaerobio facultativo, que no forma espora y fermenta lactosa produciendo gas al incubarse por 48 horas a 44.5 °C, pertenece al grupo de los coliformes fecales donde también se ubica a *Klebsiella*.

Por otra parte, los grupos que incluyen a los coliformes totales son *E. coli*, *Klebsiella*, *Enterobacter* y *Citrobacter*, son aerobios y anaerobios facultativos, Gram negativos, no

forman esporas y fermentan lactosa produciendo gas al incubarse por 48 horas a 35 °C (Bitton G, 1994).

Para *Salmonella* spp su mínima dosis infecciosa es de  $10^4$  y  $10^7$  UFC. Está relacionada genética y metabólicamente a *E. coli*, son patógenas al ser humano y es transmitida por la ruta fecal oral. Se presenta también en productos que contengan huevo sin cocinar y productos lácteos, produciendo enfermedades como fiebre tifoidea y salmonelosis. La aparición de la enfermedad ocurre en el intestino grueso y delgado iniciando los síntomas entre 8 a 48 horas después de la ingestión.

Por otra parte, los virus entéricos pueden ser arrojados al ambiente en altas concentraciones  $10^5$  y  $10^{11}$  partículas por gramo de heces fecales y al mantenerse viables por largos periodos de tiempo alcanzar las fuentes de abastecimiento de agua y los alimentos que consumimos. Entre otras fuentes de transmisión se encuentra la falta de higiene al preparar alimentos, la irrigación con aguas residuales domésticas y la fertilización de predios agrícolas con estiércoles.

Por lo anterior, el estudio de patógenos entéricos tiene la finalidad de minimizar los brotes de enfermedades, una herramienta en este estudio bacterias indicadores como coliformes fecales y totales que sirven para detectar posible contaminación fecal (Zhang *et al.*, 2008; Balzer *et al.*, 2010; Sampson *et al.*, 2006; Jung *et al.*, 2007; McCarthy *et al.*, 2007; Astrom *et al.*, 2009; Arnone y Walling, 2007; Noble *et al.*, 2004). Un buen indicador de contaminación fecal, debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser un constituyente de la flora normal de individuos sanos.

- No debe ser patógeno al ser humano.
- Estar presente, de forma exclusiva, en las heces de animales de sangre caliente.
- Estar presentes cuando los microorganismos patógenos lo están.
- Presentarse en números elevados.
- Debe ser incapaz de reproducirse fuera del intestino de animales de sangre caliente.
- Su tiempo de supervivencia debe ser igual o superior a los patógenos entéricos, al igual que su resistencia a los factores ambientales.
- Su análisis debe ser fácil, económico y rápido.

Con respecto a los virus patógenos para determinar su remoción y comportamiento en el ambiente, se han empleado virus modelos o bacteriófagos no patogénicos para el ser humano (Zhang *et al.*, 2008; Safapour y Metcalf, 1999; Fujioka y Yoneyama, 2002; Brion *et al.*, 2002; Nappier *et al.*, 2006). Estos virus tienen mayor tolerancia a temperaturas altas que las bacterias indicadoras (Knies *et al.*, 2009), son incapaces de reproducirse en el medio ambiente, son morfológicamente similar a los virus entéricos y su análisis es relativamente sencillo, económico y rápido (Hu *et al.*, 2007). Entre los bacteriófagos más empleados se encuentran PRD1 y MS2 (Helmi *et al.*, 2010; Corapcioglu *et al.*, 2006). Entre otras características, PRD1 infecta bacterias Gram negativas como *E. coli* y *S. typhimurium*, posee una membrana lípido-proteica bajo la cápsula proteínica similar al adenovirus y al rotavirus. El virus es de forma icosaedral, con un tamaño de 62 nm y  $24 \times 10^6$  daltons de peso molecular (Ferguson *et al.*, 2007). MS2 es un virus desnudo, similar a los enterovirus, (coxaquivirus, poliovirus y

enterovirus), con 27 nm de tamaño, infecta *E. coli*, es de forma icosaedral, y tiene un peso molecular de  $3.5 \times 10^6$  daltons (Lazarova y Savoye, 2004; Huertas *et al.*, 2003; Sidhu *et al.*, 2008; Dawson *et al.*, 2005).

El agua es una fuente transmisora de enfermedades, y la presencia de bacterias y virus patógenos al ser humano es de gran preocupación para la salud pública (Zhang *et al.*, 2008; Hagens y Loessner, 2007). Como una medida de prevención, en los sectores rurales se acostumbra desinfectar el agua para beber mediante calor utilizando diversas fuentes de energía. El calor producido actúa desnaturalizando proteínas esenciales y los ácidos nucleicos de los microorganismos (Mitsuzawa *et al.*, 2006). El calor también se utiliza para pasteurizar la leche, reduciendo la carga microbiana causante de tuberculosis, brucelosis, fiebre Q y fiebre tifoidea.

Por esta razón para la disminución de brotes de enfermedades diarreicas en sectores rurales se busca la implementación de nuevos métodos de abastecimiento y saneamiento del agua, utilizando alternativas más viables y económicas, que satisfagan las necesidades vitales de estas comunidades, tal como la energía solar, que recientemente ha recibido una fuerte atención en la desinfección del agua para prevenir brotes de enfermedades entéricas (Kehoe *et al.*, 2004; Onyango *et al.*, 2009).

### **6.5 Desinfección térmica.**

Como ya fue mencionado, el calor se ha utilizado como un método físico para la desinfección del agua. La muerte de los microorganismos decrece de forma logarítmica con el tiempo de exposición y cuando su reducción es notable, la velocidad de

destrucción puede disminuir debido a la supervivencia de microorganismos más resistentes. Los siguientes factores afectan la magnitud de la tasa de sobrevivencia de los microorganismos en el ambiente y también su eliminación:

- Composición de la población microbial.
- Duración de la exposición a la desinfección térmica; el tiempo de residencia necesario para su eliminación.
- Factores ambientales que actúan durante el tratamiento térmico como el pH, compuestos orgánicos o inorgánicos.

Mitsuzawa *et al.* (2006) mencionan que los microorganismos mueren cuando son sometidos a temperaturas superiores a los límites máximos de crecimiento, desnaturalizando y degradando las proteínas esenciales, así como la desnaturalización de los ribosomas. En consecuencia, las células no pueden mantener sus funciones vitales lo que conduce a su inactivación.

Cuando una suspensión, con microorganismos en su fase coloidal, se calienta a temperatura constante, el decaimiento de la concentración inicial de estos microorganismos viables sigue una reacción de primer orden, de acuerdo a la siguiente Expresión 2 (Peleg *et al.*, 2003):

$$-\frac{dN}{dt} = -kN \quad (2)$$

Donde:  $N$  es el número de microorganismos viables (CFU, PFU, esporas o quistes),  $t$  es tiempo (min) y  $k$  es el coeficiente de reacción de primer orden para la inactivación de las poblaciones microbiales ( $\text{min}^{-1}$ ).

Para todo microorganismo existe una temperatura máxima de crecimiento por encima de la cual muere, lo que permite desarrollar combinaciones de tiempo y temperatura que aseguren un efecto destructivo. Por ello, esta eficacia se expresa como tiempo de reducción decimal (D), tiempo necesario para destruir el 90 % de microorganismos en una muestra de agua, como lo muestra la Figura 3. Este valor es igual al recíproco de la curva de sobrevivencia y es una medida de la tasa de muerte de un microorganismo.

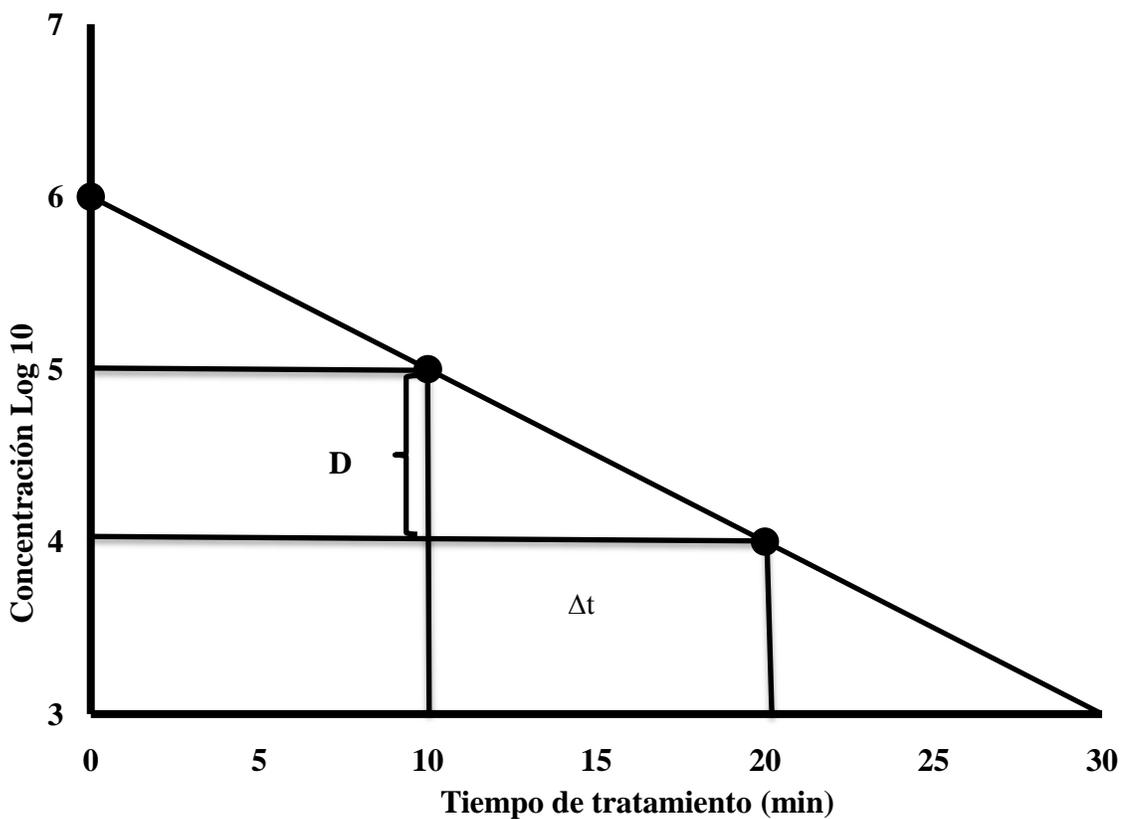


Figura 3.- Tiempo de reducción decimal por calor.

Para la obtención del valor D, en minutos, se emplea la Ec. 1:

$$D = \frac{\Delta t}{\text{Log}\left(\frac{N_i}{N_f}\right)} \quad (1)$$

Donde:  $t$  es tiempo transcurrido para alcanzar un 90 % de inactivación (min),  $N_i$  concentración inicial (UFP, UFC, esporas o quistes de parásitos) y  $N_f$  es la concentración de los microorganismos al alcanzar un 90 % de reducción.

La temperatura y tiempo de exposición para la eliminación de microorganismos, varía dependiendo de cada uno de ellos, como se muestra en la Cuadro 3.

**Cuadro 3.- Tiempo de control térmico para algunos microorganismos.**

<b>Organismo</b>	<b>Temperatura` (°C)</b>	<b>Tiempo (minutos)</b>
<i>Escherichia coli</i>	65	1
<i>Salmonella spp</i>	65	1
<i>Vibro Cólera</i>	55	19
Células vegetativas	100	10
Esporas	100	10
Poliovirus	60	25
Hepatitis A	70	10
Rotavirus	50	36

## **6.6 La radiación solar.**

La luz solar al atravesar la atmósfera sufre alteraciones por los procesos de absorción, reflexión y refracción. La radiación que llega a la superficie terrestre sin ningún disturbio se clasifica en directa, y difusa la que cambia su dirección por procesos de refracción y reflexión ocurridos en la atmósfera. La energía que se recibe en una superficie en un instante determinado es llamada irradiación, teniendo como unidad

Watts por metro cuadrado ( $\text{W m}^{-2}$ ), misma que varía en el transcurso del día a razón de las condiciones ambientales presentes y al movimiento la tierra.

Otro concepto importante es la insolación, determinada por la integración de la irradiación en un período determinado, teniendo unidades de energía por área, Watts horas por metro cuadrado ( $\text{W h m}^{-2}$ ), generalmente reportado como una acumulación de energía diaria, estacional o anual (Duffie y Beckman, 2006).

### **6.7 Antecedentes de colectores solares.**

La energía solar se ha implementado desde tiempos inmemorables para obtener productos agrícolas y electricidad, entre otros. En 214 a. C., Herón de Alejandría construyó una bomba de agua impulsada por energía solar. Arquímedes utilizó espejos para concentrar la energía solar e incendiar los barcos romanos. En 1878, se desarrollaron estudios sobre concentradores solares de tipo cilíndricos parabólicos. A mediados de la década de 1970 los avances tecnológicos para el aprovechamiento de la energía solar empieza a tomar fuerza en el mundo, despertando gran interés en las universidades, el gobierno y la industria, empleándolos en el calentamiento del agua (Arif *et al.*, 2004). En 1970, 80, y 90 Australia fué líder mundial en la industria de la energía solar, en el ámbito fotovoltaico (Solar Power, 2008).

En 1979, China comienza con investigaciones sobre la concentración solar. Después de 30 años de desarrollo China ha tenido importantes avances sobre materiales absorbentes de energía solar, almacenamiento, equipos de concentración, sistemas solares Stirling, generadores de alta temperatura y torres de energía solar (Zhifeng *et al.*, 2010).

La Academia de Ciencias China, desarrolló una serie de concentradores tipo cilíndrico parabólico, con 8.6 m de longitud, de ancho 5.76 m y con un tubo paralelo a la parábola de 2 m de longitud y 105 mm de diámetro ubicado sobre el foco de la parábola que sirve para conducir un fluido, calentado por la energía solar (Figura 4).

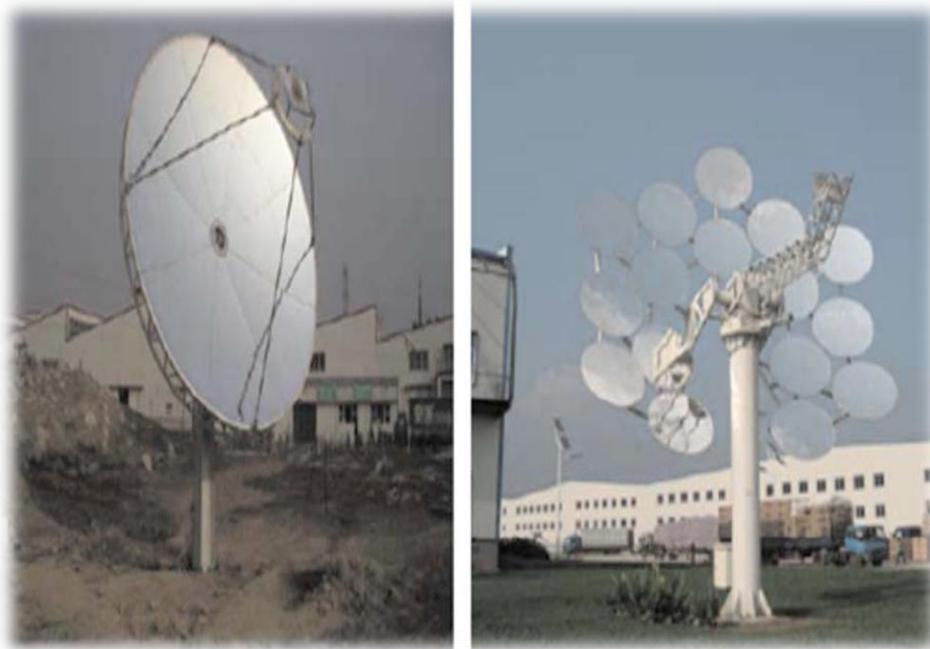
Los concentradores de tipo parabólico son los más empleados debido a que siguen la trayectoria solar obteniendo temperaturas hasta de 1000 °C. La misma academia desarrolló durante el periodo del 2000 a 2005 tres concentradores solares con 5 m de diámetro, incluyendo seguimiento solar automático, además, con espejos reflejantes alcanzando un 90 % de reflectividad y una eficiencia no inferior al 91 %, Figura 5 y 6 (Zhifeng et al., 2010).



**Figura 4. Concentrador solar cilíndrico, según de Zhifeng *et al.*, 2010.**



**Figura 5. Concentradores solares parabólicos, según de Zhifeng *et al.*, 2010.**



**Figura 6.- Concentrador solar parabólico, según de Zhifeng *et al.*, 2010.**

Recientemente, la energía solar está siendo considerada en términos prácticos como una probable fuente de energía aplicable, principalmente para la generación de electricidad

(Odeh y Morrison, 2006; Lovegrove y Dennis, 2006; Alcocer y Hiriart, 2008); sin embargo, esta energía puede ser utilizada para reducir la carga microbiana del agua y de otros líquidos o suspensiones mediante su tratamiento térmico, o también a través de la incidencia directa de la radiación solar sobre los microorganismos por un tiempo determinado (Mtapuri-Zinyowera *et al.*, 2009; Rijal *et al.*, 2003; Koschikowski *et al.*, 2003; Ki *et al.*, 2007).

Trabajos de investigación realizados en Irán para la desinfección del agua para consumo humano se emplearon botellas de tereftalato de polietileno (PET) disponibles en comunidades no urbanas, las muestras se tomaron de aguas superficiales de un canal a cielo abierto en Tehrán, realizándose los experimentos en otoño con una temperatura media del aire de 17 °C con cielo despejado. Las botellas fueron expuestas a la luz solar por 3, 6 y 8 horas con un volumen a tratar de 1.5 L. Los porcentajes de remoción de coliformes fecales se obtuvieron por el método del número más probable, alcanzando un 99.9 %, después de ser expuestas 6 y 8 horas, aproximadamente (Hosseini, 2007). Al sur de España, emplearon como indicador quistes de *Cryptosporidium parvum* con diferentes niveles de turbidez, las muestras se colocaron en botellas de PET expuestas a la luz solar por 4, 8 y 12 horas (Meera y Ahammed, 2008; Reed *et al.*, 2000; Fisher *et al.*, 2008). Después de la exposición durante 12 horas con una dosis de 1,037.06 kJ m<sup>-2</sup> los quistes viables fueron de 11.54 %, 25.96 %, 41.50 % y 52.80 %, con los niveles de turbidez de 0, 5, 100 y 300 unidades nefelométricas de turbidez (UNT), respectivamente (Gómez-Couso *et al.*, 2009).

En México, recientemente, se han efectuado investigaciones para la desinfección del agua para consumo humano mediante la energía solar, específicamente en los estados de

Chiapas y Oaxaca, como apoyo a comunidades rurales. Las pruebas de desinfección se efectúan colocando las muestras de agua en botellas de PET, de bebidas comerciales, con exposición directa al sol por más de 8 horas, para la inactivación de coliformes totales (CT) y *E coli*, que han alcanzado hasta el 100 % de desinfección (Martín-Domínguez *et al.*, 2004; Méndez-Hermida *et al.*, 2005; Boyle *et al.*, 2008; Berney *et al.*, 2006; Bosshard *et al.*, 2009; Dejung *et al.*, 2007).

## **6.8 Tipología de colectores solares.**

En función de la temperatura alcanzada por los colectores solares se pueden dividir en dos grandes grupos, colectores y concentradores:

### **6.8.1 Colectores planos.**

Dispositivos simples que permiten obtener energía calorífica de baja temperatura (inferior a 100 °C). Se caracterizan por no poseer métodos de concentración, ellos son económicos y eficientes para obtener agua caliente. Su orientación es fija y aprovecha la radiación directa y difusa. Se componen de cuatro elementos principales:

1. Cubierta transparente (vidrio o similar).
2. Placa captadora (superficie negra para la absorción de la luz solar).
3. Aislante.
4. Carcasa (contenedor de todo lo anterior).

### **6.8.2 Colectores al vacío.**

Se trata de un colector plano al que se le hace vacío entre las placas. En ellos las pérdidas se reducen a cero, obteniendo un colector ideal. Sin embargo, conseguir vacío

entre las placas, es muy difícil técnicamente. El inconveniente de este tipo de colectores es su elevado costo y mantenimiento, por lo cual, no tienen mucha aceptación en el mercado.

### **6.8.3 Concentradores de disco parabólico.**

Colectores cóncavos que proyectan la luz solar a un punto específico (foco de la parábola), mediante material reflejante como espejos, llegando a generar temperaturas hasta de 1000 °C. Se caracteriza por la tendencia a ser dirigidos al movimiento del sol de manera automática o manual.

Hay cuatro sistemas de disco parabólico que están en vía de desarrollo comercial, implementados por:

1. Boeing y Solar Energy Systems (SES). Tiene una capacidad de generar aproximadamente 23.5 kW.
2. Science Applications International Corporation (SAIC) y Stirling Thermal Motors (STM). Funciona con la energía solar o gas metano producido por desechos municipales, generando 25 kW.
3. Schlaich, Bergermann, und Partner y SOLO. Concentrador solar con permanente seguimiento del sol.
4. Sistema para Electricidad Remota. Emplea concentrador y sistema de WG Associates y motor Stirling SOLO.

#### **6.8.4 Concentradores de canal parabólico.**

Estos sistemas están siendo utilizados en diferentes partes del mundo para generar potencia mecánica o eléctrica. Un ejemplo de estas plantas termosolares es de la compañía de Luz Internacional, teniendo un complejo de 9 plantas que obtienen 350 Megawatt ( $MW_e$ ).

#### **6.8.5 Sistemas de torre central.**

Estas plantas utilizan espejos para concentrar la radiación solar en un receptor. Mediante un fluido la energía térmica es colectada y enviada a la base de la torre para ser aprovechada para generación de potencia, que puede alcanzar 100 a 200  $MW_e$  (SAGARPA, 2009).

## **VII.-MATERIALES Y MÉTODOS**

### **7.1 Área de trabajo.**

El concentrador solar tipo parabólico se utilizó en las instalaciones de la Facultad de Agronomía Campus Marín de la UANL, en el Municipio de Marín N.L., a  $25^{\circ}52'23.66''$  de latitud norte y  $100^{\circ}02'42.45''$  de longitud oeste a, una elevación sobre el nivel medio del mar de 355 m. La energía solar promedio recibida en el año es de  $945 \text{ W m}^{-2}$ . El clima de la región es extremoso, con régimen de lluvias en agosto y septiembre, con precipitaciones anuales que fluctúan entre 250-500 mm. Los meses de

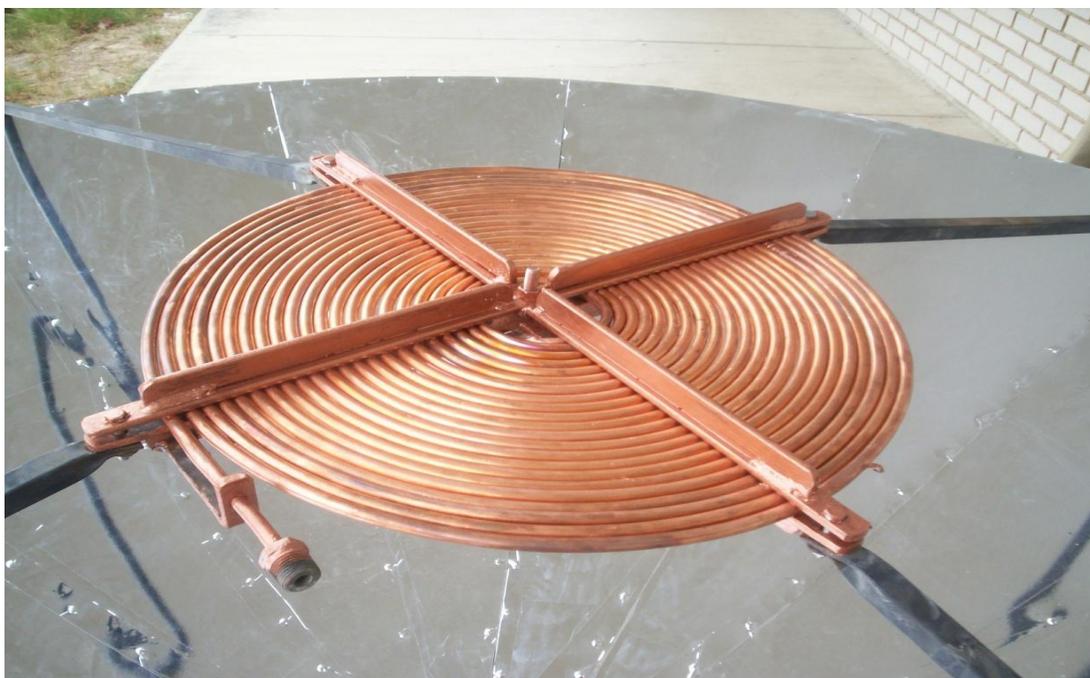
más altas temperaturas son julio y agosto, la dirección de los vientos es de norte a sur con una temperatura media anual de 22 °C.

## **7.2 Construcción del concentrador solar tipo parabólico.**

La construcción del concentrador solar se llevó a cabo por medio de una parábola de recepción satelital de 3 m de diámetro, se recubrió con lámina de acero inoxidable calibre 24, recubriéndose con papel poliéster adhesivo J790 plata (DIMASA) para obtener el mayor reflejo de la energía solar (Figura 7). La energía reflejada se concentró sobre un serpentín de cobre con 0.0095 m de diámetro y 21 m de longitud, situado en el foco del concentrador a 1.12 m sobre el centro de la parábola (Figura 8). El concentrador esta sujetado en una base metálica construida con tubo de 1 m de largo y 4 pulgadas de diámetro cementado al suelo. El concentrador seguía el movimiento del sol mediante modificaciones de su posición en forma manual.



**Figura 7.- Recubrimiento de la parábola con acero inoxidable y papel poliéster.**



**Figura 8.- Serpentín de cobre para la desinfección del agua.**

El serpentín del colector tiene un volumen de 1.5 L, el flujo de agua a través de él fue por gravedad, esto se logró al conectar un recipiente de 20 L, colocado a 3 m de altura sobre el serpentín de cobre, mediante manguera de plástico de 0.0127 m de diámetro y 6 m de longitud. Una válvula de policloruro de vinilo (PVC) tipo globo de 0.0127 m de diámetro conectada a un tubo de cobre de 0.0127 m de diámetro y 1.5 m de longitud permitió regular el flujo de agua a través del colector (Figura 9). Al final del serpentín, un tubo de cobre de 0.0127 m de diámetro y 1.5 m de longitud permitió la descarga del fluido.



**Figura 9.- Concentrador solar tipo parabólico con flujo por gravedad para la desinfección del agua.**

### **7.3 Transferencia de energía.**

El principio de conservación de energía en un sistema que pasa por un proceso, puede ser expresado como la diferencia total de energía entrante y la energía total saliente en el desarrollo del proceso. Por consiguiente, el balance de energía para el sistema puede ser expresado por la siguiente ecuación:

$$\Delta Q_{\text{sist}} = Q_{\text{ent}} - Q_{\text{sal}} \quad (8)$$

Done:  $Q_{\text{ent}}$  energía total de entrada al sistema,  $Q_{\text{sal}}$  energía total de salida del sistema y  $\Delta Q_{\text{sist}}$  es el cambio de energía del sistema.

Tomando al sistema de desinfección como un sistema de masa constante y que no actúa ninguna interacción de trabajo solo transferencia de calor, la relación de balance de energía puede ser expresada por:

$$dQ = mCdT \quad (9)$$

Donde:  $Q$  es la cantidad neta de transferencia de calor que entra o sale del sistema (J),  $m$  es la masa del sistema,  $C$  es el calor específico del cobre y  $dT$  es la diferencial de temperaturas del sistema. Mientras que el flujo de calor ó transferencia de calor por unidad de área perpendicular a la dirección de esa transferencia puede ser expresado por la siguiente ecuación:

$$q = \frac{\Delta Q}{A} \quad (10)$$

Donde:  $A$  es el área de transferencia de calor,  $\Delta Q$  es la cantidad neta transferida de calor y  $q$  es el flujo de calor ( $\text{W m}^{-2}$ ).

Además, el tiempo para suministrar el calor necesario para aumentar la temperatura del sistema para la desinfección, se expresa mediante la siguiente relación (Cengel, 2007):

$$\Delta t = \frac{Q}{v} \quad (11)$$

Donde  $Q$  es la cantidad neta de calor transferido (kJ),  $v$  es la velocidad de transferencia de calor ( $\text{kJ s}^{-1}$ )

#### **7.4 Ley de enfriamiento de Newton.**

El contacto de un cuerpo caliente o frío relativo a una superficie conductiva, genera un flujo de calor como consecuencia de las diferencias de energía entre ambos que se

manifiesta por un gradiente de temperatura. Esta transferencia de energía puede predecirse mediante la Ley de Enfriamiento de Newton cuya ecuación se obtiene modificando la Ec. 9 de la siguiente manera:

$$\frac{dT}{dt} = k(T_s - T_m) \quad (12)$$

Donde  $t$  es tiempo (min),  $k$  es el parámetro de enfriamiento ( $\text{min}^{-1}$ ),  $T_s$  es la temperatura de la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ), y  $T_m$  es la temperatura del medio ( $^{\circ}\text{C}$ ) lejos de la superficie. La solución a la ecuación diferencial en su forma más simple para estimar la temperatura del cuerpo sólido o del sistema en cualquier momento es la siguiente:

$$T = T_m - (T_0 - T_m)e^{-kt} \quad (13)$$

Donde  $T_0$  es la temperatura inicial del cuerpo. Esta ecuación fue utilizada para predecir a partir de los datos experimentales la temperatura promedio alcanzada por el agua en el serpentín, el parámetro de enfriamiento y contrastar la temperatura inicial, medida y simulada, del agua.

### **7.5 Obtención de bacterias y virus.**

Los microorganismos indicadores *E. coli* 15597 y virus modelo PRD1 se obtuvieron del Laboratorio de Remediación Ambiental y Análisis de Suelos, Aguas y Plantas de la Facultad de Agronomía de la UANL.

### **7.6 Replicación de bacterias y virus.**

Las suspensiones bacterianas se prepararon inoculando *E. coli* 15597 en 100 ml de caldo de soya tripticaseína (BDBioxon, México) incubándose por 24 h a 37  $^{\circ}\text{C}$  (Karim *et al.*,

2008). El conteo se realizó por medio del método de filtración a través de membranas de nitrocelulosa de 47 mm de diámetro y 0.45  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro (Caslake *et al.*, 2004; Craig *et al.*, 2002; Dejung *et al.*, 2007). Una alícuota de 0.1 mL de diluciones decimales sucesivas ( $10^{-6} - 10^{-14}$ ) en agua destilada estéril, de la suspensión bacteriana se usó para determinar la concentración de las bacterias después de un periodo de incubación de 24 horas a 37 °C en placas de agar mEndo (BDDIFCO, México).

Para el bacteriófago PRD1 se replicó por el método de doble capa (Kim *et al.*, 2009) descrito por Adams en 1959 (Lazarova y Savoye, 2004; Bennett *et al.*, 2010) usando como huésped *S. typhimurium* (Davis *et al.*, 2006; Allwood *et al.*, 2003; Gournal y Gerba, 1999), en agar de soya tripticaseína (BDBioxon, México) a una concentración de 40 g L<sup>-1</sup>. Para el análisis del colifago, una alícuota de 0.1 mL de una suspensión de virus se mezcló con 0.5 mL de su hospedero en 30 g L<sup>-1</sup> de caldo de soya tripticaseína (BDBioxon, México) preparado con agar bacteriológico al 10 % (BDBioxon, México). Esta suspensión se añadió a la placa de agar de soya y posterior a su solidificación se incubó a 37 °C por 24 h (Allwood *et al.*, 2005). Para recuperar el virus, se preparó una solución salina base trizma, Hidroximetil aminometano, (Spectrum, E.U.A.) de acuerdo a las siguientes concentraciones (en g L<sup>-1</sup>): Base trizma, 39.5; cloruro de sodio, 102.25; cloruro de potasio, 4.66; fosfato de sodio dibásico, 0.70. La solución trizma se diluyó 1:10 en agua desionizada. Después de 3 h a temperatura ambiente (25 °C) se añadieron 6 mL de solución trizma a la caja petri. La suspensión se recuperó en una botella de polipropileno de 250 mL y se centrifugó a 15,000 g (Centrifuge 5804 R eppendorf) por 15 min. El sobrenadante se filtró a través de una membrana de nitrocelulosa de 47 mm de diámetro y 0.45  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro (Millipore Corporate, E.U.A.).

## 7.8 Sitio de muestreo en los pantanos artificiales.

Los pantanos construidos se localizan en Marín N.L. a 25° 52'45'' latitud norte y 100° 02'46'' longitud oeste, se abastece del agua residual de un tratamiento previo que consiste en lagunas de oxidación de ubicación en el mismo.

Se tomaron dos muestras de agua residual cada una de 19 L, antes de entrar al pantano subsuperficial con una conductividad eléctrica de 1.82 mS, pH 7.06, temperatura de 30.8 °C y turbidez de 255 UNT (Unidades Nefelométricas de Turbidez). En la salida del pantano el efluente presentó las siguientes características físicas: conductividad 1.71 mS, pH 7.13, temperatura de 29.3 °C y turbidez de 25.84 UNT. Para el conteo de coliformes totales y fecales se utilizó filtración por membrana en agar mEndo y mFc, respectivamente (Sinton *et al.*, 2002; Sinton *et al.*, 2007; Gomila *et al.*, 2008; Lucena *et al.*, 2004). Estas mismas muestras se utilizaron para aislar los bacteriófagos nativos a la entrada (PE) y salida (PS) del pantano. El conteo de bacteriófagos se llevó a cabo por el método de doble capa (Vidales *et al.*, 2003).

Las concentraciones en las soluciones de inyección que se emplearon para el tratamiento de desinfección, de *E. coli* 15597, PRD1, coliformes fecales entrada (CF<sub>E</sub>) y totales (CT<sub>E</sub>), coliformes fecales de salida (CF<sub>S</sub>) y totales (CT<sub>S</sub>), y bacteriófagos nativos se resumen en el Cuadro 4.

**Cuadro 4.- Concentración de inyección de los microorganismos indicadores.**

Indicador microbial	Concentración de inyección	
	UFC mL <sup>-1</sup>	UFP mL <sup>-1</sup>
<i>E coli</i> 15597	1.22 X 10 <sup>7</sup>	
PRD1		2.01 X 10 <sup>8</sup>
CF <sub>E</sub>	1.53 X 10 <sup>4</sup>	
CF <sub>S</sub>	1 X 10 <sup>2</sup>	
CT <sub>E</sub>	8.25 X 10 <sup>4</sup>	
CT <sub>S</sub>	7.5 X 10 <sup>3</sup>	
Fago PE		9.2 X 10 <sup>3</sup>
Fago PS		1.75 X 10 <sup>3</sup>
Fago PE <sub>r</sub>		8.85 X 10 <sup>6</sup>
Fago PS <sub>r</sub>		7.55 X 10 <sup>6</sup>

PE, PS Fagos de pantano entrada y salida; fagos del pantano aislados y replicados PE<sub>r</sub> y PS<sub>r</sub>

### 7.9 Pruebas de desinfección y muestreo.

Para la desinfección del agua, cada microorganismo fué introducido al sistema en forma individual sólo CF y CT fueron añadidos conjuntamente. Cada microorganismo fué analizado para el cual fué evaluado mediante la relación entre el volumen del serpentín y el gasto introducido (Cuadro 5 y 6). La muestra colectada fue de 20 mL, con una repetición, en cada tiempo de residencia, determinándose su temperatura y almacenándose en hielo hasta su análisis. Las condiciones climatológicas del día 10 de Julio del 2009 fueron con una temperatura máxima de 39.5 °C y mínima de 23.4 °C, con una velocidad promedio de viento de 15.9 k m h<sup>-1</sup>, predominando los vientos del este. Para el día 3 de Noviembre del 2010 las condiciones climatológicas de temperatura

máxima y mínima fueron 26.6 °C y 7.7 °C, respectivamente, con una velocidad promedio del viento 19.6 k m h<sup>-1</sup>, predominando vientos del noroeste.

**Cuadro 5.- Tiempos de residencia para la remoción de diferentes microorganismos presentes en el agua, mediante el tratamiento térmico utilizando la energía solar (10 de Julio del 2009).**

Indicador microbial	Medio de suspensión	Tiempo (min)			
		T1	T2	T3	T4
<i>E. coli</i> 15597	A.D <sup>1</sup>	5.2	3.2	2.3	
CT y CF	I.P <sup>2</sup>	8.2	3.4	2.4	
	E.P <sup>3</sup>	7.3	2.7	2.5	
Colifagos	I.P <sup>2</sup>	8.2	3.4	2.4	
	E.P <sup>3</sup>	7.3	2.7	2.5	
PRD-1	A.D <sup>1</sup>	23.5	5.7	5.0	2.4

A.D.<sup>1</sup>=Agua destilada; I.P.<sup>2</sup>=Influyente pantano; E.P.<sup>3</sup>=Efluyente pantano.

**Cuadro 6.- Tiempos de residencia para la remoción de diferentes microorganismos presentes en el agua, mediante el tratamiento térmico utilizando la energía solar (03 de Noviembre del 2010).**

Indicador microbial	Medio de suspensión	Tiempo (min)		
		T1	T2	T3
Colifago PE	A.D <sup>1</sup>	5.78	3.98	3.49
Colifago PS	A.D <sup>1</sup>	6.49	5.66	3.27

A.D.<sup>1</sup>=Agua destilada.

### 7.10 *Escherichia coli* 15597.

La solución bacterial después de ser introducida al sistema de desinfección, se analizó utilizando el método de filtración por membrana en placas de mEndo, para cuantificar su concentración después de 24 h de incubación a 37 °C. Para los tiempos de residencia t<sub>1</sub>

se analizaron 10 y 1 mL de muestra sin diluir. Para los tiempos restantes se utilizaron diluciones decimales sucesivas ( $10^{-1}$ - $10^{-6}$ ). La concentración de la *E. coli* se calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$[C] = \frac{F}{V*d} \quad (12)$$

Donde,  $[C]$  es la concentración de *E. coli* (UFC mL<sup>-1</sup>),  $F$  es la enumeración por dilución por placa,  $V$  es el volumen de muestra utilizado 0.1 mL y  $d$  es la dilución utilizada para el análisis. Los gastos ( $Q_n$ ) asociados a cada tiempo de residencia se midieron volumétricamente.

### **7.11 Virus PRD1.**

La solución del bacteriófago se analizó por el método de doble capa, incubando las muestras por 24 horas a 37 °C. Para muestras correspondientes a  $t_1$ , se empleo 1 mL de muestra sin diluir, para el  $t_2$  0.1 y 1 mL de muestra sin diluir y para los tiempos restantes se utilizaron diluciones decimales sucesivas ( $10^{-1}$ - $10^{-6}$ ). La concentración se calculó por medio de la Ec 12.

### **7.12 Desinfección y muestreo en pantanos artificiales.**

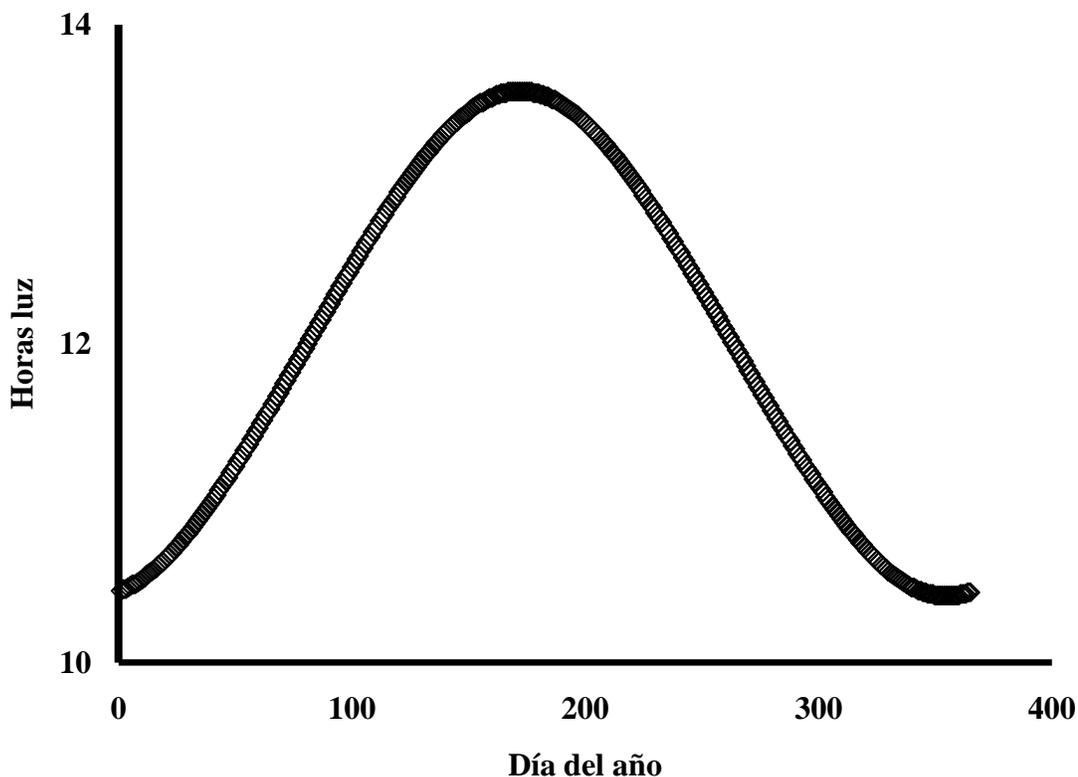
Las muestras que se tomaron a la entrada y salida del pantano subsuperficial, para cada una de ellas se tomaron 2 muestras de aproximadamente 20 mL. Se utilizó el método de filtración por membrana en placas de mEndo para CT, las cuales fueron cuantificadas después de 24 h de incubación a 37 °C. CF fueron cultivadas en placas de mFC y cuantificadas después de 24 h de incubación a 44.5 °C. Las muestras de la entrada del pantano se analizaron con 1 y 0.1 mL de muestra sin diluir así como una dilución a  $10^{-1}$ .

Para las muestras de la salida del pantano se analizaron con 10, 1 y 0.1 mL de muestra sin diluir. La concentración se calculó por medio de la Ec 12.

Para los bacteriófagos nativos se tomaron 2 muestras de aproximadamente 20 mL. Se utilizó el método de doble capa, incubando las muestras por 24 horas a 37 °C. Todas las muestras se analizaron con 0.1 y 1 mL de muestra sin diluir. Asimismo para el análisis del fago nativo replicado de PE se empleó una dilución a  $10^{-4}$  para  $t_1$  y  $t_2$  y 0.1 mL sin diluir para  $t_3$ . Para fago nativo replicado del PS se utilizó la misma forma de análisis para su cuantificación y para el  $t_3$  la dilución a  $10^{-3}$ . Para obtener la concentración de los bacteriófagos, se calculó por medio de la Ec 13.

### **VIII.-Resultados y Discusión**

Para el municipio de Marín N.L., se estimaron las horas luz que recibe anualmente, se calculó por la formula de Cooper 1969 teniendo un comportamiento como se muestra en la Figura 10. Lo cual proporcionó un promedio de radiación solar de  $945 \text{ W m}^{-2}$ , que al ser recibidos por los  $7.06 \text{ m}^2$  de área de la parábola resultaron en un flujo de calor al serpentín de  $6671.7 \text{ W m}^{-2}$ . De esta radiación solo el 79 % es reflejada al serpentín, debido a la eficiencia del papel reflejante.



**Figura 10.- Estimación de horas luz que se reciben en Nuevo León anualmente.**

En el caso particular de este estudio, para elevar la temperatura del agua dentro del serpentín de 25.7 °C a 100 °C es necesario suministrar al sistema 858.84 kJ y el tiempo requerido para ello es de 13.84 min estimado mediante la Ec 8. La temperatura del agua alcanzada al final del sistema fue dependiente de los tiempos de residencia utilizados durante los ensayos (Cuadro 7), mayores temperaturas fueron alcanzadas para los tiempos de residencia más largos.

**Cuadro 7.-Temperatura del agua en función de los tiempos de residencia; 10 de Julio del 2009.**

		Temperatura °C			
Indicador microbial	Medio de suspensión	T1	T2	T3	T4
<i>E. coli</i> 15597	A.D <sup>1</sup>	80	62	55	
CT y CF	I.P <sup>2</sup>	98	75	70	
	E.P <sup>3</sup>	93	62	59	
Colifagos	I.P <sup>2</sup>	98	75	70	
	E.P <sup>3</sup>	93	62	59	
PRD-1	A.D <sup>1</sup>	98	87	81	64

A.D.<sup>1</sup>=Agua destilada; I.P.<sup>2</sup>=Influyente pantano; E.P.<sup>3</sup>=Efluente pantano.

El Cuadro 8 presenta los resultados de los experimentos realizados el 3 de Noviembre 2010. Puede observarse que las temperaturas alcanzadas fluctuaron entre 52 y 72 °C para los diferentes tiempos de residencia utilizados.

**Cuadro 8.- Temperatura del agua en función de los tiempos de residencia (03 de Noviembre del 2010).**

		Temperatura °C		
Indicador microbial	Medio de suspensión	T1	T2	T3
Colifago PE	A.D <sup>1</sup>	72	68	64
Colifago PS	A.D <sup>1</sup>	71	62	52

A.D.<sup>1</sup>=Agua destilada.

La temperatura óptima para la remoción, estuvo en función de la velocidad de flujo o el gasto, lo que también determinó el tiempo de residencia. En el concentrador, el serpentín alcanzó temperaturas elevadas, transfiriendo esta energía al fluido, durante el tiempo de contacto, para lograr su desinfección (Figura 11 y 12). El concentrador solar funcionó como un método físico para la inactivación de *E. coli* 15597. Así mismo para la

eliminación de coliformes totales y fecales con diferente turbidez, el porcentaje de remoción para ambos fue del 99.99 % tomando lecturas a 24 y 48 horas después de incubación, no se presentaron unidades formadoras de colonias viables. Sin embargo, al transcurrir las 48 horas de incubación se presentaron colonias atípicas. Para las muestras colectadas a la entrada del pantano se utilizó 1 mL de muestra para los tiempos de residencia  $t_2$  y  $t_3$  con una concentración de  $3.73 \times 10^4$  y  $4.38 \times 10^4$  UFC mL<sup>-1</sup>, respectivamente, para  $t_1$  no se presentaron colonias atípicas para ninguno de los dos tiempos de incubación. En el pantano salida se empleó 10 mL de muestra, después de transcurrido 48 horas de incubación se presentaron colonias atípicas, para  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$  con 4, 7.8 y 11.2 UFC mL<sup>-1</sup>, respectivamente.

Con respecto al PRD1 en el  $t_1$  y  $t_2$  se alcanzaron el 99.99 y 99.4 % de remoción, respectivamente, empleando 1 mL de muestra; Para los bacteriófagos nativos del influente se obtuvo para  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$  el 99.99, 99.1 y 84 % de remoción, y para el efluente 99.99, 97 y 47.4 % de remoción, empleando para todos los tiempos de residencia 1 mL de muestra. Con respecto a los fagos nativos a pesar de presentar la solución de inyección una alta turbidez, no se afectó el sistema de tratamiento.

Para los bacteriófagos nativos de los pantanos que se aislaron y replicaron en el laboratorio para  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$  del influente se obtuvo 99.99, 56.4 y 39.5 % de remoción y para efluente 91.75, 58.6 y 27.15 % respectivamente.

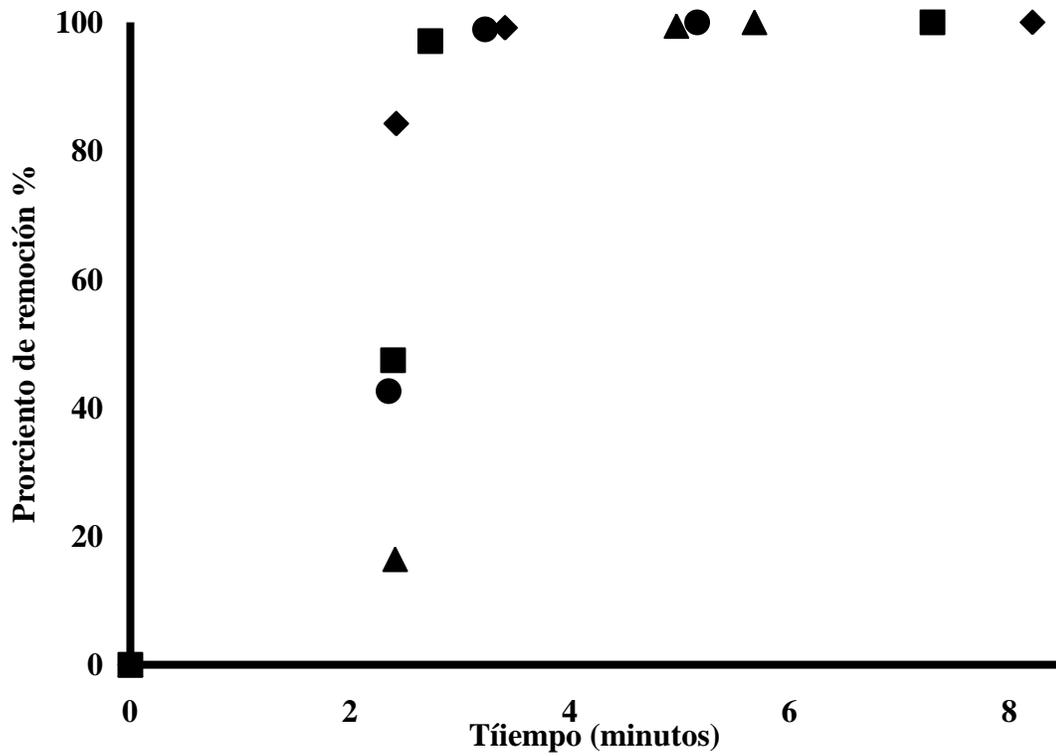


Figura 11.- Remoción de *E. coli* 15597 (●), PRD1 (Δ) y Bacteriófagos nativos PE (□);PS.(◇).

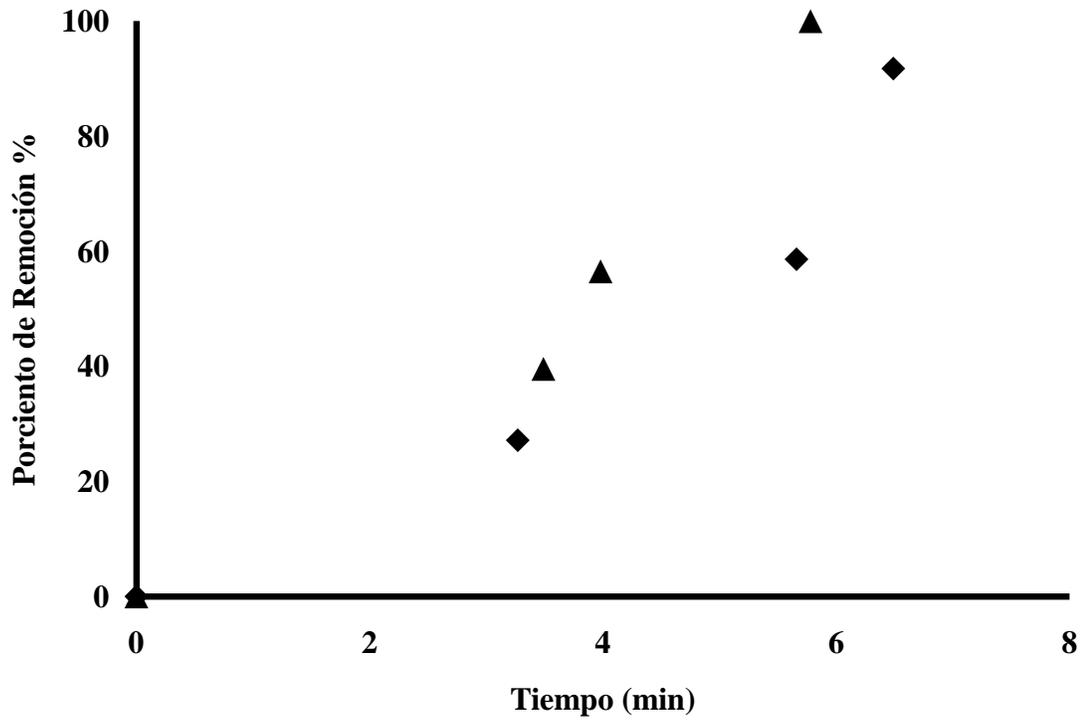


Figura 12.- Remoción de bacteriófagos nativos; PE<sub>r</sub>(Δ);PS<sub>r</sub> (◇)

Las temperaturas alcanzadas a la salida del sistema para los diferentes tiempos de residencia se modelaron con la Ecuación de Enfriamiento de Newton en Mathcad profesional 2000 (Mathsoft, Cambridge MA) utilizando el método de mínimos cuadrados. Las variables libres utilizadas fueron la temperatura ambiental, la temperatura del sistema y el parámetro de enfriamiento (k). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 13 en donde se muestra un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.94.

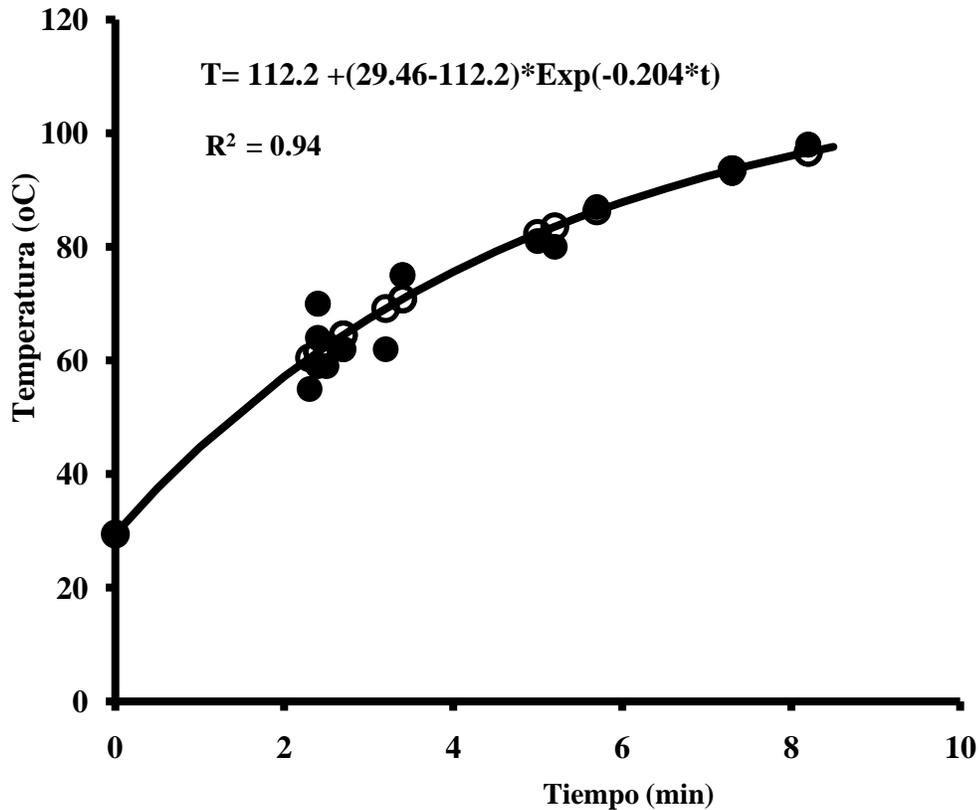


Figura 13.- Curva de simulación del modelo de enfriamiento de Newton; Datos experimentales (●), Datos estimados por el modelo (○).

Por medio de las variaciones de las temperaturas y el tiempo transcurrido para su desinfección, se calculó el tiempo de reducción decimal para cada microorganismo (Cuadro 10). Para los bacteriófagos nativos del pantano la remoción fue similar; sin embargo para los fagos nativos replicados se puede observar que para los obtenidos de residencia en el sistema para su remoción. Para *E. coli*, coliformes fecales y totales de entrada y salida del pantano, se obtuvieron lecturas cercanas a cero, inferiores a 20 UFC en todos los tiempos de residencia, lo cual se establece como el límite inferior de detección recomendado (APHA/AWWA/WEF, 1998).

**Cuadro 9.- Tiempo de reducción decimal para la remoción de microorganismos indicadores.**

Indicador microbial	Tiempo de reducción decimal (min)			
	98 °C	87 °C	81 °C	64 °C
PRD1		0.81	2.23	30.81
	98 °C	75 °C	70 °C	
Fago nativo PE	1.37	1.64	2.99	
	93 °C	62 °C	59 °C	
Fago nativo PS	1.39	1.76	8.95	
	72 °C	68 °C	64 °C	
Fago nativo PE <sub>r</sub>	1.27	11.54		
	71 °C	62 °C	52 °C	
Fago nativo PS <sub>r</sub>	5.86	17.27	23.77	

Los resultados obtenidos son satisfactorios, sugiriendo que el colector solar tipo parabólico puede ser un método eficaz para eliminar microorganismos patógenos presentes en agua contaminada, obteniendo altos niveles de remoción microbial al

operar el sistema de tratamiento con 255-25.84 UNT de turbidez, con temperaturas mínimas de 7.7 °C y con velocidad promedio del viento 19.6 k m h<sup>-1</sup>, las cuales fueron las condiciones más desfavorables observadas durante el presente estudio.

La revisión de literatura realizada sobre la desinfección del agua por medio de la energía solar, no detectó algún trabajo sobre la inactivación de microorganismos mediante un colector solar tipo parabólico de flujo constante. Sin embargo, se encontraron investigaciones las cuales logran la inactivación por medio de los rayos ultravioleta (UV) recibidos por la radiación solar. Rijal y Fujioka, (2003) realizaron la desinfección de agua por medio de la energía solar con reflectores de aluminio y UV. El agua se colocó en botellas de plástico, utilizando como indicadores *E. coli*, CF, enterococos y colifagos, elevando la temperatura del agua a 64-75 °C. Después de 5 h de exposición al sol, no se detectaron UFC ni UFP, sin embargo, al dejarlo solamente 2 h si se detectó presencia de bacterias y colifagos. El volumen tratado fue 13 L para abastecer 6 personas al día. Gómez-Couso *et al.*, (2009) al sur de España utilizaron botellas PET de 1.5 L en las cuales colocaron las muestras de agua inoculadas con ooquistes de *Cryptosporidium* con distinta turbidez de 0, 5, 100 y 300 UNT, exponiéndolas por 12 horas a la luz solar UV; las remociones obtenidas fueron 11.54 %, 25.96 %, 41.50 % y 52.80 %, respectivamente. Dejung *et al.*, (2007) utiliza el proceso de desinfección del agua en la ciudad Cochabamba, Bolivia, mediante la exposición al sol en botellas de plástico, recibiendo 320 a 405 nm de UV y alcanzando una temperatura de 50 °C. Estas condiciones son requeridas para la eliminación *Bacillus subtilis* y colifagos. El tiempo de exposición fue de 6 a 10 horas, obteniendo remociones de 90, 99.99, 99.9999 % de la concentración inicial.

Por otra parte en la Universidad Nacional de Seúl, Corea, Amin y Han (2009) usaron botellas PET de 2 L para evaluar la desinfección del agua de lluvia exponiéndolas de 8 a 10 h a los rayos del sol con una irradiación de  $200-700 \text{ Wm}^{-2}$ , y alcanzando temperaturas de 35 a 48 °C, empleando como indicador microbiológico CF, CT y *E. coli*, logrando remociones hasta del 80 %. Mtapuri-Zinyowera *et al.*, (2009) emplean la energía solar para la desinfección de agua en botellas PET de 2 L pintadas de negro, exponiendo por 7 h las muestras inoculadas con quistes de *Giardia duodenalis* y *Entamoeba histolytica* a los rayos UV lo que incremento su temperatura de 50 °C a 56 °C para alcanzar una remoción de 93.2 y 92.6 % respectivamente. Martínez-Domínguez *et al.*, (2004), en comunidades rurales de los estados de Oaxaca y Chiapas, México, usaron botellas de plastico de 2 L, que se colocaron dentro de un concentrador solar cuadrado, recubierto con papel aluminio, con una capacidad de 2 botellas bajo una radiación aproximadamente  $700 \text{ W m}^{-2}$ . Después de 8 h de exposición la temperatura se incrementó de 50 °C a 65 °C. para alcanzar una desinfección del 73 %.

## **IX.-Conclusiones**

El propósito de la presente investigación fue evaluar un concentrador solar tipo parabólico para inactivar la carga microbiana de agua contaminada.

Los resultados obtenidos muestran que este tipo de sistemas pueden reducir las bacterias presentes hasta 99.99 % después de 5.2 min tiempo de residencia. Mientras que los virus indicadores, PRD1 y colifagos nativo, fueron reducidos hasta un 91.5 % cuando el tiempo de residencia fue 6.41 minuto.

Las condiciones climatológicas juegan un papel determinante en los niveles de desinfección ya que la temperatura del aire y del sistema determina las temperaturas alcanzadas en el agua como lo expresa el modelo de Newton. Los resultados obtenidos demuestran que los concentradores solares tipo parabólico son adecuados para la desinfección de agua biológicamente contaminada en poblaciones sin acceso a agua potable, requiriendo mínima inversión y costos de mantenimiento.

## X.- Bibliografía

- Alcocer S. M. y Hiriart G. (2008) An applied research program on water desalination with renewable energies. *Am J Environ Sci.*, **4**, 190-197.
- Allwood P. B., Malik Y. P., Hedberg C. W. y Goyal S. M. (2003) Survival of F-specific RNE coliphage, feline calcivirus, and *Escherichia coli* in water: a comparative study. *Appl. Environ. Microbiol.*, **69**, 5707-5710.
- Allwood P. B., Malik Y. S., Maherchandani S., Hedberg C. W. y Goyal S. M. (2005) Effect of temperature on the survival of F-Specific RNA coliphage, Feline Calicivirus, and *Escherichia coli* in chlorinated water. *Int J Environ Res Public Health.*, **2**, 442-446.
- Amin M.T y Han M. (2009) Roof-harvested rainwater for potable purposes: application of solar disinfection (SODIS) and limitations. *Water Sci Technol -WST* **60**, 419-431.
- Arif H., Koray U. y Rustu E. (2004) Solar energy application in Turkey. *Energ Sources.*, **26**, 5551-561.
- Arnone D.R. y Perdek W. J. (2007) Waterborne pathogens in urban watersheds. *J Water Health.*, **5**, 49-162.
- Astrom J., Pettersson T.J.R., Stenstrom A. y Bergstedt O. (2009) Variability analysis of pathogen and indicator loads from urban sewer systems along a river. *Water Sci Technol.*, **59**, 203-212.

- APHA/AWWA/WEF. 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998)*, 20th edition, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington, DC
- Balzer M., Witt N., Flemming H.C. y Wingender J. (2010) Fecal indicator bacterial in river biofilms. *Water Sci Technol.*, **61**,1105-1111.
- Bennett H.B., O'Dell H.D., Norton G., Shin G., Hsu F.C. y Meschke J.S. (2010) Evaluation of a novel electropositive filter for the concentration of viruses from diverse water matrices. *J Water Sci Technol.*, **61**, 317-322.
- Berney M., Weilenmann H.U., Simonetti A. y Egli T. (2006) Efficacy of solar disinfection of *Escherichia coli*, *Shigella flexneri*, *Salmonella Typhimurium* and *Vibrio cholera*. *Appl. Environ. Microbiol.*
- Bitton G. (1994) *Wastewater Microbiology*. Wiley-liss, New York.
- Bosshard F., Berney M., Scheifele M., Hans-Ulrich W. y Egli T. (2009) Solar disinfection (SODIS) and subsequent dark storage of *Salmonella Typhimurium* and *Shigella flexneri* monitored by flow cytometry. *Appl. Environ. Microbiol.*, **155**, 1310-1317.
- Boyle M., Sichel C., Fernández-Ibáñez P., Arias-Quiroz B., Iriarte-Puña M., Mercado A., Ubomba-Jaswa E. y McGuigan K.G. (2008) Bactericidal effect of solar water disinfection under real sunlight conditions. *Appl. Environ. Microbiol.*, **74**, 2997-3001.
- Brion G. M., Meschke J. S. y Sobsey M. D. (2002) F-specific RNA coliphages: occurrence, types, and survival in natural waters. *Water Res.*, **36**, 2419-2425.
- Caslake L.F., Connolly DJ., Menon V., Duncanson C.M., Rojas R. y Tavakoli J. (2004) Disinfection of contaminated water by using solar irradiation. *Appl. Environ. Microbiol.*, **70**,1145-1150.
- Cengel Y.A. (2007) *Transferencia de calor y masa*. Ed 3 901.
- CONAGUA. (2009) *Situación del subsector de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Ed 2009 224.
- CONAGUA. (2010) *Estadística del agua en México*. Ed 2010 249.
- Corapcioglu M. Y., Vogel J. R., Munster C. L., Pillai S. D., Dowd S. y Wang S. (2006) Virus transport experiments in a sandy aquifer. *Water, Air, Soil Pollut.*, **169**, 47-65.

- Craig D.L., Fallowfield H.J. y Cromar N.J. (2002) Enumeration of fecal coliforms from recreational coastal sites: evaluation of techniques for the separation of bacteria from sediments. *Appl. Environ. Microbiol.*, **93**, 557-565.
- Davis J.A., Farrah S.R. y Wilkie A.C. (2006) Adsorption of viruses to soil: impact of anaerobic treatment. *J Water Sci Technol.*, **54**, 161-167.
- Dawson D.J., Paish A., Staffell L. M., Seymour I. J. y Appleton H. (2005) Survival of viruses on fresh produce, using MS2 as a surrogate for norovirus. *J Appl Microbiol.*, **98**, 203-209.
- Dejung S., Fuentes I., Almanza G., Jarro R., Navarro L., Arias G., Urquieta E., Torrico A., Fenandez W., Iriarte M., Birrer C., Stahel W.A. y Wegelin M. (2007) Effect of solar water disinfection (SODIS) on model microorganisms under improved and field SODIS conditions. *J Water Serv Res Tec.*, **56**, 245-256.
- Duffie J.A. y Beckman W.A. (2006) *Solar Engineering of Thermal Processes*. Ed 3. 908.
- Ferguson C.M., Davies C.M., Kaucner C., Krogh M., Rodehutsors J., Deere D.A. y Ashbolt N.J. (2007) Field scale quantification of microbial transport from bovine faeces under simulated rainfall events. *J Water Health.*, **5**, 83-95.
- Fisher M. B., Keenan C. R., Nelson K. L. y Voelker B. M. (2008) Speeding up solar disinfection (SODIS): effects of Hydrogen peroxide, temperature, pH, and copper plus ascorbate on the photoinactivation of *E. coli*. *J Water Health.*, **6**, 35-51.
- Fujioka R.S. y Yoneyama B.S. (2002) Sunlight inactivation of human enteric viruses and fecal bacteria. *Water Sci Technol.*, **46**, 291-295.
- Gómez-Couso H., Fontán-Saínz M., Sichel C., Fernández-Ibáñez P. y Ares-Mazás E. (2009) Efficacy of the solar water disinfection method in turbid waters experimentally contaminated with *Cryptosporidium parvum* oocysts under real field conditions. *Trop Med Int Health.*, **14**, 620-627.
- Gomila M., Solis J. J., David Z., Ramon C. y Lalucat J. (2008) Comparative reductions of bacterial indicators, bacteriophage-infecting enteric bacteria and enteroviruses in wastewater tertiary treatments by lagooning and UV-radiation. *J Water Sci Technol.*, **58**, 2223-2233.

- Governal R. A. and Gerba C. P. (1999) Removal of MS-2 y PRD-1 bacteriophages from an ultrapure water system. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, **23**, 166-172.
- Graf J., Meierhofer R., Wegelin M. y Hans-Joachim M. (2008) Water disinfection and hygiene behaviour in an urban slum in kenya: impact on childhood diarrhoea and influence of beliefs. *J. Environ. Sci. Health.*, **18**, 335-355.
- Hagens S. y Loessner M. J. (2007) Application of bacteriophages for detection and control of foodborne pathogens. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **76**, 513-519.
- Helmi K., Menard-Szczebara F., Lenes D., Jacob P., Jossent J., Barbot C., Delabre K. y Arnal C. (2010) Adenovirus, MS2 and PhiX174 interactions with drinking water biofilms developed on PVC, cement and cast iron. *J Water Sci Technol.*, **61**, 3198-3207.
- Hossein M. A. (2007) Feasibility of solar energy in disinfection of drinking water in Iran. *American-Eurasian J. Agric. Environmental. Sci.*, **2**, 407-410.
- Hu J. Y., Chu X. N., Quek P. H., Feng Y. Y. y Tan X. L. (2007) Inactivation of particle-associated viruses by UV. *J Water Supply Res T.*, **56**, 393-397.
- Huertas A., Barbeau B., Desjardins C., Galarza A., Figueroa M.A. y Toranzos G.A. (2003) Evaluation of Bacillus subtilis and coliphage MS2 as indicators of advanced water treatment efficiency. *J Water Sci Technol.*, **47**, 255-259.
- Jensen P.K., Jayasinghe G., van der Hoek W., Cairncross S. y Dalsgaard A. (2004) Is there an association between bacteriological drinking water quality and childhood diarrhoea in developing countries. *Trop Med Int Health.*, **2**, 1210-1215.
- Jung K.W., Yoon C.G., Jang J.H. y Jeon J.H. (2007) Characteristics of indicator microorganisms in paddy rice plots after reclaimed water irrigation. *J Water Sci Technol.*, **55**, 2 267-273.
- Karim M. R., Glenn E. P. y Gerba C. P. (2008) The effect of wetland vegetation on the survival of *Escherichia coli*, *Salmonella Typhimurium*, bacteriophage. *J Water Health.*, **6**, 167-175.
- Kehoe S.C., Barer M.R., Devlin L.O. y McGuigan K.G. (2004) Batch process solar disinfection is an efficient means of disinfecting drinking water

- contaminated with *Shigella dysenteriae* type I. *Appl. Environ. Microbiol.*, **38**, 410-414.
- Ki S. J., Ensari S. y Kim J. H. (2007) Solar and tidal modulations of fecal indicator bacteria in coastal waters at Huntington beach, California. *Environ Manage.*, **39**, 867-875.
- Kim W.J., Managaki S., Furumai H. y Nakajima F. (2009) Diurnal fluctuation of indicator microorganisms and intestinal viruses in combined sewer system. *J Water Sci Technol.*, **60**, 2791- 2801.
- Knies J.L., Kingsolver J.G. y Burch C.L. (2009) Hotter is better and broader: thermal sensitivity of fitness in a population of bacteriophages. *Amer Nat.*, **173**.
- Koschikowski J., Wieghaus M. y Rommel M. (2003) Solar thermal driven desalination plants based on membrane distillation. *Water Sci Technol* ., **3**, 49-55.
- Lazarova V. y Savoye Ph. (2004) Technical and sanitary aspects of water disinfection by UV irradiation for landscape irrigation. *J Water Sci Technol.*, **50**, 203-209.
- Liu Q., Yu G. y Liu J.J. (2009) Solar radiation as large-scale resource for energy-short world. *Energy Environment.*, **20**, 319-329.
- Lovegrove K. y Dennis M. (2006)Solar thermal energy systems in Australia. *Int J Environ Stud.*, **63**, 791-802.
- Lucena F., Duran A. E., Morón A., Calderón E., Campos C., Gantzer C., Skrabber S. y Jofre J. (2004) Reduction of bacterial indicators and bacteriophages infecting fecal bacteria in primary and secondary wastewater treatments. *J Apply Microbiol.*, **97**, 1069-1076.
- Martín-Domínguez A., Fonseca-Moreno O., González-Herrera A., Estrada-Gasca C.A., Alarcón-Herrera M.T. y Martín-Domínguez I.R. (2004) Pilot study of water disinfection using solar concentrators in rural communities. *Water Sci Technol.*, **4**, 147-155.
- McCarthy D.T., Mitchell V.G., Deletic A. y Diaper C. (2007) *Esherichia coli* in urban stormwater: explaining their variability. *J Water Sci Technol.*, **56**, 27-34.
- Meera V. y Ahammed M. M. (2008) Solar disinfection for household treatment of roof-harvested rainwater. *J Water Sci Technol.*, **8**,153-160.

- Méndez-Hermida F., Castro-Hermida J.A., Ares-Mazás E., Kehoe S.C. y McGuigan K.G. (2005) Effect of batch-process solar disinfection on survival of *Cryptosporidium parvum* oocysts in drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.*, **73**, 1653-1654.
- Mitsuzawa S., Deguchi S. y Horikoshi K. (2006) Cell structure degradation in *Escherichia coli* and *Thermococcus* sp. Strain Tc-1-95 associated with thermal death resulting from brief heat treatment. *FEMS.*, **260**, 100-105.
- Moser S. y Mosler H. (2008) Differences in influence patterns between groups predicting the adoption of a solar disinfection technology for drinking water in Bolivia. *Soc Sci Med.*, **67** 497-504.
- Mtapuri-Zinyowera S., Midzi N., Muchaneta-Kubara C.E., Simbini T. y Mduluza T. (2009) Impact of solar radiation in disinfecting drinking water contaminated with *Giardia duodenalis* and *Entamoeba histolytica/dispar* at a point-of-use water treatment. *Appl. Environ. Microbiol.*, **106**, 847-852.
- Nappier S. P., Aitken M. D. y Sobsey M. D. (2006) Male-Specific coliphages as indicators of thermal inactivation of pathogens in biosolids. *Appl. Environ. Microbiol.*, **72**, 2471-2475.
- Noble R. T., Lee I. M. y Schiff K. C. (2004) Inactivation of indicator microorganisms from various sources of fecal contamination in seawater and freshwater. *Appl. Environ. Microbiol.*, **96**, 464-472.
- Odhed S.D. y Morrison G.L. (2006) Optimization of parabolic trough solar collector system. *Int J Energ Res.*, **30**, 259-271.
- Onyango E. A., Thoruwa T F N., Maingi S. M. y Njagi E.M. (2009) Performance of a 2-Element plane reflector augmented galvanized pipe flat plate collector for solar water pasteurization. *J Food Technol.*, **7**,12-19.
- Peleg M., Normand M. D. y Campanella O. H. (2003) Estimating microbial inactivation parameters from survival curves obtained under varying. *B Math Biol.*, **65**, 219-234.
- Reed R. H., Mani S. K. y Meyer V. (2000) Solar photo-oxidative disinfection of drinking water preliminary field observations. *Lett Appl Microbiol.*, **30**, 432-436.
- Richter J.L. (2009) Solar collector basic. *J Renew Sust Energ.*

- Rijal G.K. y Fujioka R.S. (2003) Use of reflectors to enhance the synergistic effects of solar heating and solar wavelengths to disinfect drinking water sources. *J Water Sci Technol.*, **48**, 481-488.
- Safapour N. y Metcalf R.H. (1999) Enhancement of solar water pasteurization with reflectors. *Appl. Environ. Microbiol.*, **65**, 859-861.
- SAGARPA. (2009) Proyecto de energía renovable para la agricultura.
- Sampson R.W., Swiatnicki S.A., Osinga V.L., Supita J.L., McDermott C.M. y Kleinheinz G.T. (2006) Effects of temperature and sand on *E coli* survival in a northern lake water microcosm. *J Water Health.*, **4**, 389-393.
- Shehane S.D., Harwood V.J., Whitlock J.E. y Rose J.B. (2005) The influence of rainfall on the incidence of microbial faecal indicators and the dominant sources of faecal pollution in a Florida river *Appl. Environ. Microbiol.*, **98** 1127-1136.
- Sidhu J.P.S., Hanna J. y Toze S.G. (2008) Survival of enteric microorganisms on grass surfaces irrigated with treated effluent. *J Water Health.*, **06**, 255-262.
- Sinton L. W., Hall C. H., Lynch P. A. y Davies-Colley R.J. (2002) Sunlight inactivation of fecal indicator bacteria and bacteriophages from waste stabilization pond effluent in fresh and saline waters. *Appl. Environ. Microbiol.*, **68**,1122-1131.
- Sinton L., Hall C. y Braithwaite R. (2007) Sunlight inactivation of *Campylobacter jejuni* and *Salmonella* enteric, compared with *Escherichia coli*, in seawater and river water. *J Water Health.*, **5**, 357-365.
- Smith R.J., Kehoe S.C., McGuigan K.G. y Barer M.R. (2000) Effects of simulated solar disinfection of water on inactivity of *Salmonella Typhimurium*. *Appl. Environ. Microbiol.*, **31**, 284-288.
- Taylor R. ‘‘The sun rises slowly for Australian Solar’’, 12 November 2008,) <<http://www.sciencealert.com.au/features/20081211-18431.html>> 12 Diciembre 2010.
- Thurman R., Faulkner B., Veal D., Cramer G. y Meiklejohn M. (1998) Water quality in rural Australia. *J Apply Microbiol.*, **84**, 627-632.
- Vidales J. A. Gerba C. P. y Karpiscak M. M. (2003) Virus removal from wastewater in a multispecies subsurface-flow constructed wetland. *Water Environ Res.*,238-245.

Zhang C.M., Wang X.C., Liu Y.J. y Xue X.P. (2008) Characteristics of bacterial and viral contamination of urban waters: a case study in Xi'an, China. *Water Sci Technol.*, **58**, 653-660.

Zhifeng W., Xin L., Zhihao Y. y Meimei Z. (2010) Concentrating solar power development in China. *J Sol Energ.*, **132** 021203-1-021203-8.