

## ENERGÍA SOLAR, UNA ALTERNATIVA PARA LA DESINFECCIÓN DE AGUA

**María T. Alarcón Herrera**

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Miguel de Carvantes 120, Chihuahua, Chih., 31109, México,  
(614) 439 1121, [teresa.alarcon@cimav.edu.mx](mailto:teresa.alarcon@cimav.edu.mx)

**Ignacio R. Martín Domínguez**

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Miguel de Carvantes 120, Chihuahua, Chih., 31109, México,  
(614) 439 1121, [ignacio.martin@cimav.edu.mx](mailto:ignacio.martin@cimav.edu.mx)

**Alejandra Martín Domínguez**

Instituto de Investigaciones Eléctricas. Calle Reforma 113, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor., 62490, México,  
(777) 362-3811 ext. 7051, 7112, [amartin@correo.iie.org.mx](mailto:amartin@correo.iie.org.mx)

### RESUMEN

La fracción ultravioleta de la radiación del sol es capaz de inactivar y destruir bacterias y virus, por lo que constituye una alternativa para desinfectar agua y tiene un gran potencial de aplicación en sitios donde no se cuenta con infraestructura de abastecimiento de agua y energía eléctrica.

En el presente trabajo se probó la eficiencia de la tecnología de desinfección solar en la remoción de coliformes totales (CT) y E. Coli (EC) de agua para consumo humano en una comunidad del estado de Chihuahua, México.

La eficiencia de la desinfección de agua por energía solar se determinó en los meses de mayo y agosto con agua de la fuente más contaminada en la zona de estudio, que tenía un número más probable de CT por cada 100 mL de agua (NMP) de entre  $10^3$  y  $10^4$ . Las pruebas consistieron en estudiar el efecto de desinfectar agua por exposición directa en botellas de plástico de refrescos comerciales transparentes, parcialmente pintadas de negro o completamente negras a la radiación solar durante todo el día, con y sin concentración solar, en días completamente soleados y medio nublados.

Los resultados muestran que la desinfección puede ser llevada a cabo al 100% mediante el uso de la radiación solar. El uso de concentradores y botellas medio negras aumenta la eficiencia de inactivación de CT y EC, disminuyendo el tiempo de exposición solar requerida para la desinfección a sólo 4 horas.

Palabras clave: desinfección del agua, energía solar, aplicaciones energía solar.

### ABSTRACT

The ultraviolet spectrum of solar radiation is capable of inactivating and destroying bacteria and viruses, which makes it an alternative for the disinfection of water with a great application potential in places with no water supply infrastructure or electricity.

In the present work, the efficiency of the solar disinfection technology for the removal of total coliforms (TC) and E. Coli (EC) from drinking water in a community of the state of Chihuahua, Mexico, was tested.

The efficiency of the solar disinfection technology was determined in the months of May and August with water from

the most contaminated source in the study zone, which had a TC most probable number for every 100 mL of water (MPN) between  $10^3$  and  $10^4$ . The tests consisted in studying the effect of disinfecting water through direct exposure to solar radiation in transparent plastic bottles of commercial beverages, which were either half-painted lengthwise or completely painted black. The bottles were exposed during the whole day, with and without solar concentrators, in sunny and partially cloudy days.

The results show that 100% water disinfection can be reached through the sole exposure to solar radiation. The use of concentrators and half-black bottles increases the TC and EC inactivation efficiency, reducing the solar exposure time required for disinfection to only 4 hours.

Keywords: water disinfection, solar energy, applications of solar energy.

### INTRODUCCIÓN

De acuerdo con datos de la Organización Panamericana de la Salud, un 4.5% de los casos de enfermedades a nivel mundial se debe al consumo de agua no potable. El 60% de la mortalidad infantil mundial es causada por enfermedades infecciosas y parasitarias, la mayoría de las cuales está relacionada con el agua. (OPS, 2003). Estas enfermedades son causadas por diferentes tipos de microorganismos y pueden ser prevenidas a través de la desinfección del agua antes de su consumo.

Hay diversos métodos de desinfección disponibles para asegurar la calidad bacteriológica del agua, entre los que se encuentran el uso de ozono, radiación ultra violeta, plata coloidal y cloro, así como la ebullición del agua contaminada (AWWA, 1999). De estas alternativas de tratamiento, las únicas utilizadas en comunidades rurales por su costo y facilidad de manejo son las tres últimas. Sin embargo, hay comunidades rurales remotas donde la población no acepta el sabor del agua tratada con cloro y el uso de la plata coloidal está limitado por su costo y escasa disponibilidad. En muchas de éstas, los habitantes no hierven el agua debido a la escasez de leña o porque el sabor del agua cambia al hervirla. Además, son muchos los casos en que el agua se recontamina fácilmente una vez desinfectada debido a los malos hábitos higiénicos de sus consumidores (Martín *et al*, 2000).

Una alternativa a los métodos de desinfección convencionales es la desinfección solar, que consiste en exponer el agua contaminada en botellas de plástico a la radiación solar por un tiempo determinado. Los microorganismos son altamente sensibles a la fracción ultravioleta (UV) de la luz del sol, por lo que la técnica se basa principalmente en el uso de la radiación solar para inactivar los microorganismos patógenos del agua. Esta técnica ha demostrado ser eficiente en la inactivación y destrucción de bacterias patógenas (Wegelin, 1999; Conroy, 1999; McGuigan, 1998; Reed, 1997; Sommer, 1995; Márquez, 1993). Por su simplicidad y bajo costo, esta tecnología está dirigida a poblaciones rurales que no tienen acceso a sistemas de potabilización, no hierven ni cloran el agua, y están interesadas en tratar únicamente la requerida para su consumo.

Una de las limitaciones de aplicación de este método es el hecho de que la intensidad de la radiación solar es menor en días nublados, lo que a su vez disminuye la eficiencia de la desinfección. Para incrementar la radiación incidente en días nublados, se considera el uso de concentradores solares (Martín *et al.*, 2000; Parsons, 2002).

## OBJETIVO

Determinar la aplicabilidad de la tecnología de desinfección solar en días soleados y semi-nublados, en una comunidad rural, considerando el uso de botellas de plástico transparentes, botellas medio negras y concentradores solares.

## METODOLOGÍA DE TRABAJO

Las pruebas se llevaron a cabo en el poblado de Norogachi, en el municipio de Guachochi del Estado de Chihuahua. El clima imperante en la zona de estudio es semi-frío y sub-húmedo, con lluvias en verano. La comunidad cuenta con 672 habitantes, y sólo 82 viviendas cuentan con agua entubada (INEGI, 2000).

Se llevó a cabo un muestreo para determinar la calidad del agua en la comunidad, en función del cual se determinó un sitio para llevar a cabo las pruebas de desinfección.

Las pruebas se realizaron en los meses de mayo y agosto con agua del pozo que abastece a una clínica en la comunidad, dado que este sitio presentó el mayor contenido de coliformes totales y *E. coli*.

Las pruebas se llevaron a cabo en días soleados y nublados. Las botellas se llenaron de agua tomada directamente del pozo y se expusieron al sol bajo las diferentes modalidades de prueba (sobre el piso y en concentradores) desde las 9:00 hasta las 17:00 horas del día.

### Materiales usados en la desinfección solar

Botellas totalmente transparentes, botellas con una franja negra pintada a lo largo en la parte inferior y botellas pintadas totalmente de negro

Concentradores solares de 3 tipos: cuadrado con capacidad para tres botellas de 2L, rectangular con capacidad para cuatro botellas de 2L, y de doble parábola con capacidad para dos botellas de 2L.

### Medición de la radiación solar

La radiación solar se midió utilizando un piranómetro Eppley Blanco y Negro modelo 8-48, capaz de medir un rango espectral de 285-2800 nm, instalado horizontalmente cerca de los concentradores. La temperatura se obtuvo directamente del agua dentro de las botellas utilizando termopares marca Fluke, que registraron la temperatura cada 10 minutos.

### Métodos de análisis bacteriológicos

La calidad bacteriológica del agua se midió con base en la cantidad de Coliformes Totales (CT) y *E. coli* (EC) como número más probable por cada cien mililitros (NMP/100 mL), utilizando el método del sustrato específico Colilert. Este método está aprobado por la agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) y está incluido dentro de los métodos estándar para la determinación de la calidad del agua.

### Concentradores utilizados

Se utilizaron un concentrador cuadrado de paredes planas con capacidad para tres botellas de 2L de refresco comercial. Un concentrador rectangular de paredes planas con capacidad para 4 botellas de 2L y uno de doble parábola con capacidad para 2 botellas de 2L, todos recubiertos con cinta de aluminio.

La concentración solar teórica de los equipos de paredes planas ( $C$ ) depende del área de apertura efectiva del concentrador ( $A_e$ ) y del área de recepción en la base del mismo ( $A_c$ ) (Merchant, 1966):

$$C = \frac{A_e}{A_c} \quad (1)$$

Para el caso del concentrador cuadrado (Figura 1):

$$A_e = W^2 + 4WL \sin \gamma \quad (2)$$

Donde  $W$  es el largo y ancho del concentrador,  $L$  es la longitud de las aletas, y  $\gamma$  es el ángulo de apertura de las aletas con respecto a la normal al área de la base.

La base del concentrador cuadrado se calculó para poder contener a lo largo una botella de plástico comercial de dos litros. Esto fijó un cuadrado interior de 35 cm x 35 cm, que permite contener tres botellas. Los paneles se hicieron de 35 cm. x 35 cm., y se buscó alcanzar una concentración máxima teórica de tres veces la radiación solar cuando el concentrador estuviera orientado directamente al sol. Para una radiación incidente tres veces superior a la normal, el ángulo requerido fue de 30°.

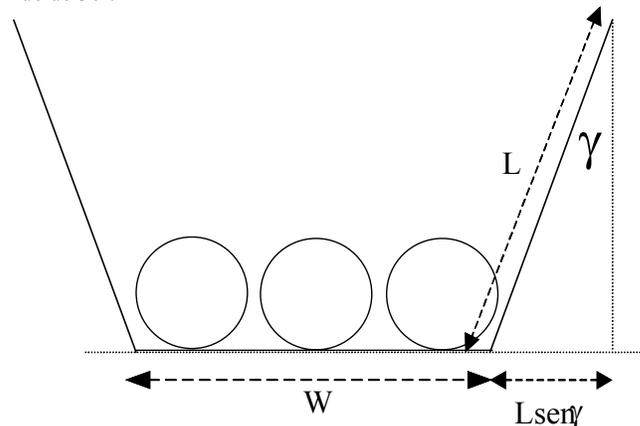


Figura 1. Vista frontal del concentrador cuadrado.

En el caso del concentrador rectangular (Figura 2):

$$A_e = BW + 2L \sin \gamma (W + B) \quad (4)$$

Donde  $B$  es el largo y  $W$  es el ancho de la base del colector.

Para este concentrador se fijaron el mismo ángulo y longitud de aletas que para el concentrador cuadrado, y fue construido para contener dos botellas a lo ancho y 4 en total. Estas consideraciones dan como resultado un rectángulo interior de 75 cm. x 22 cm. y una concentración teórica máxima de tres veces la radiación solar.

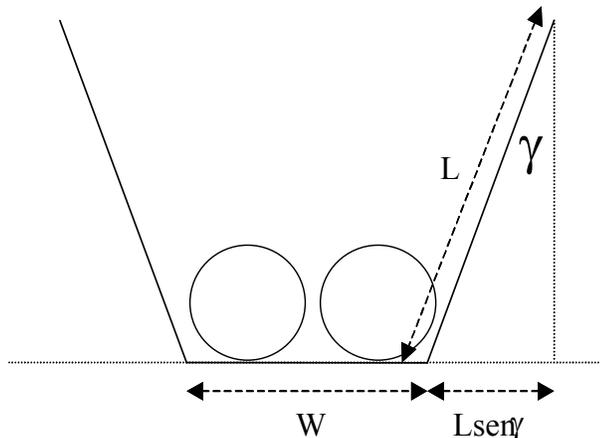


Figura 2 Vista frontal del concentrador rectangular

El diseño del concentrador de doble parábola fue tomado de Tripanagnostopoulos *et al.*, (2002), con la diferencia de que en el diseño original se utiliza un cilindro metálico pintado de negro para calentar el agua. En el presente trabajo, se colocaron botellas plásticas de refresco comercial en lugar del cilindro. Al igual que en el caso de los concentradores de paredes planas, el concentrador se dejó fijo y orientado al sol de medio día.

La concentración solar obtenida con este equipo se calculó mediante:

$$C = A_a / A_r \quad (4)$$

$A_a$  ( $A-A'$  en la Figura) es el área de apertura, que es de 31 cm x 60 cm. (1,866 cm<sup>2</sup>) para el modelo construido.

$A_r$  es la superficie expuesta de dos botellas de dos litros, calculado como si cada botella fuera totalmente cilíndrica, tuviera 11 centímetros de diámetro por 30 cm de largo, y estuviera expuesta a la radiación solar en sus tres cuartas partes. Considerando todo esto, el factor de concentración obtenido fue de 1.2 veces. Para que el equipo contara con un mayor tiempo de operación sin que fuera necesario modificar su posición durante el transcurso del día, se consideró un ángulo de apertura ( $\alpha$ ) de 90°. Para las pruebas, la estructura del concentrador de doble parábola se construyó con lámina delgada, que fue luego recubierta con cinta de aluminio autoadhesiva.

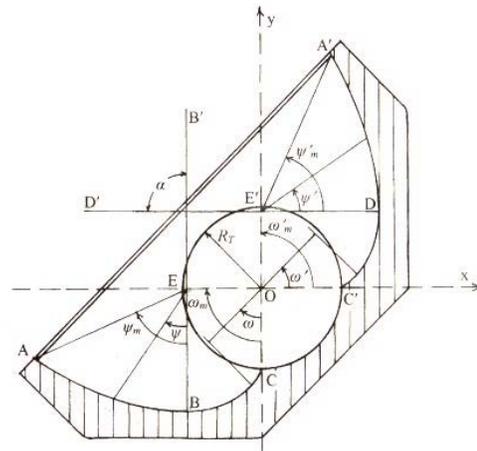


Figura 3. Sección transversal del modelo de concentrador de doble parábola

## RESULTADOS

### Monitoreo de calidad del agua

Del total de muestras analizadas en las diferentes fuentes de abastecimiento en Norogachi, el 60% no presentó contaminación por *Escherichia coli* (NMP EC < 1) y 40% presentó contaminación por *E. Coli* de entre 1 y 2,419 NMP/100 mL (Figura 4). Debido a que este tipo de coliformes está directamente relacionado con contaminación de origen fecal, su presencia en el agua aumenta significativamente el riesgo de presencia de patógenos.

Con respecto a los coliformes totales (CT), el 36% de las muestras no presentó contaminación, el 28% presentó contaminación elevada ( $100 \geq \text{NMP CT} \leq 2419$ ) y el 36% muy elevada ( $>2419$ ) (Figura 5). Los CT no son necesariamente patógenos, pero su presencia en elevadas cantidades aumenta el riesgo de que existan bacterias que sí lo sean.

La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000) establece cómo límite máximo permisible la ausencia total de Coliformes totales y *E. Coli*. El agua con valores de CT o EC superiores de la unidad no es apta para el consumo humano, por lo que es imprescindible tratarla con algún método de desinfección antes de consumirla. El 64% de las fuentes de abastecimiento de la comunidad de estudio requieren dicha desinfección.

### Pruebas de desinfección

Para determinar la intensidad de la radiación solar y el tiempo mínimo de exposición requerido para la total inactivación de los coliformes en días de nubosidad diversa, se llevaron a cabo pruebas en días soleados y nublados. Los resultados se muestran en función del valor promedio de la intensidad de radiación ( $\text{W/m}^2$ ) medida entre las 9:00 y las 17:00 horas.

Los resultados de las pruebas de desinfección se presentan en las figuras 6 y 7 y 8, las abreviaciones utilizadas en dichas figuras son las siguientes:

- P-BT = Piso, botella transparente
- P-BN = Piso, botella totalmente negra
- P-B1/2N = Piso, botella medio negra
- P-BT2.5= Piso, botella transparente
- CE-BTC = Concentrador cuadrado, botella central
- CG-BT(1)= Concentrador (rectangular), botella transparente en la posición 1
- CG-B1/2N(2) = Concentrador (rectangular), botella medio negra en la posición 2
- CG-B1/2N(3) = Concentrador (rectangular), botella medio negra en la posición 3
- CG-BT(4)= Concentrador (rectangular), botella transparente en la posición 4
- CPC-B1/2N = Concentrador de doble parábola, botella medio negra
- CPC-BT= Concentrador de doble parábola, botella transparente

Los resultados muestran que la eliminación de hasta  $1.00E+04$  coliformes totales (NMP/100mL) se llevó a cabo con todas las opciones de desinfección utilizadas tras 8 horas de exposición, aún en días con elevado nivel de nubosidad.

Al monitorear la calidad del agua a las dos horas de exposición (Figura 8), los mejores resultados se observaron con el uso del concentrador de doble parábola (CPC) con la botella medio negra y transparente, y con el concentrador rectangular.

A las cuatro horas de exposición solar, en todas las botellas monitoreadas se habían eliminado los coliformes totales (que incluyen a los E. Coli), con excepción de la botella totalmente negra, que no permite el paso de la radiación. Con este tipo de botellas no siempre se logra asegurar la desinfección, debido a que el único efecto bactericida es la temperatura, que no alcanza los valores requeridos para la pasterización.

La temperatura del agua dentro de las botellas medio negras puestas en el concentrador rectangular (Figura 9a) puede alcanzar los  $74.5^{\circ}C$  en días soleados, más de  $10^{\circ}C$  por encima de lo alcanzado dentro de las botellas del concentrador parabólico.

En días nublados, sin embargo, ambos concentradores calientan el agua hasta  $63^{\circ}C$  en el mismo tipo de botellas (Figura 9b).

El agua dentro de las botellas transparentes alcanzó una temperatura máxima de  $52^{\circ}C$  en el concentrador rectangular, y la diferencia entre la temperatura alcanzada en el concentrador parabólico no fue mayor 4 grados, tanto en días nublados como soleados.

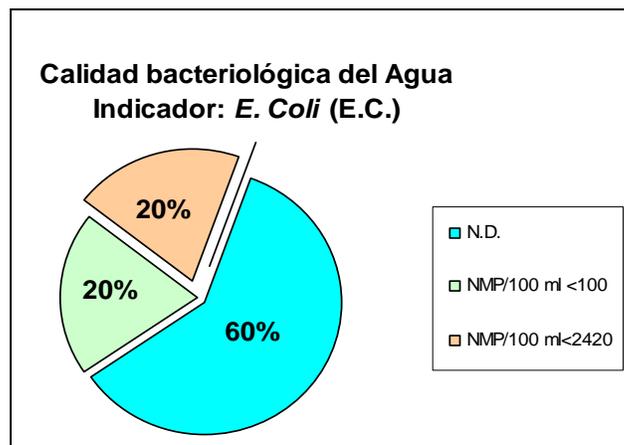


Figura 4. Contenido de E. Coli en las fuentes de abastecimiento de agua de la comunidad de estudio

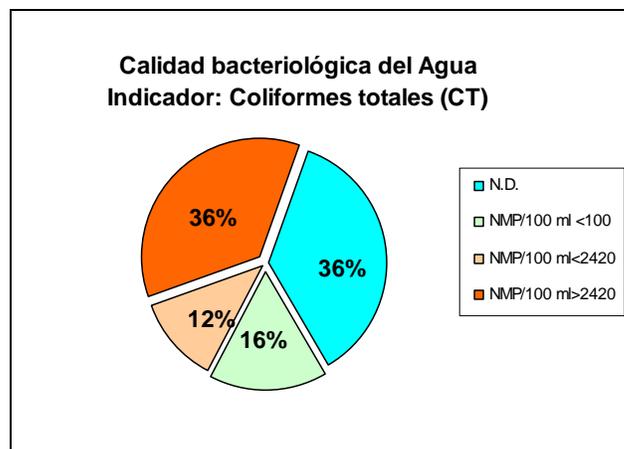
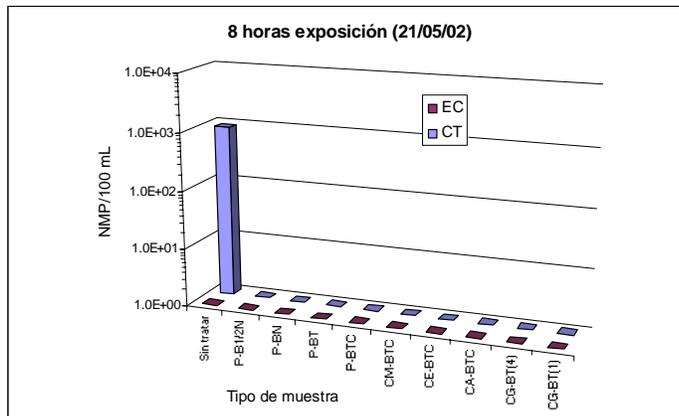
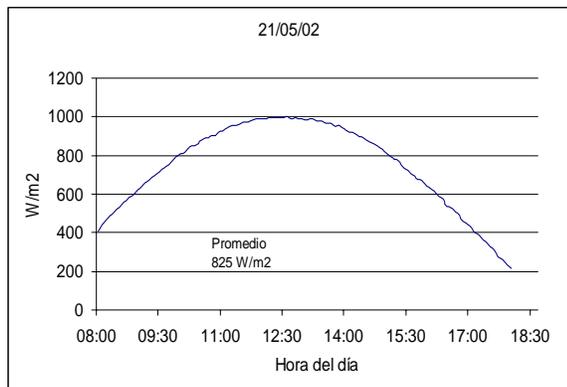


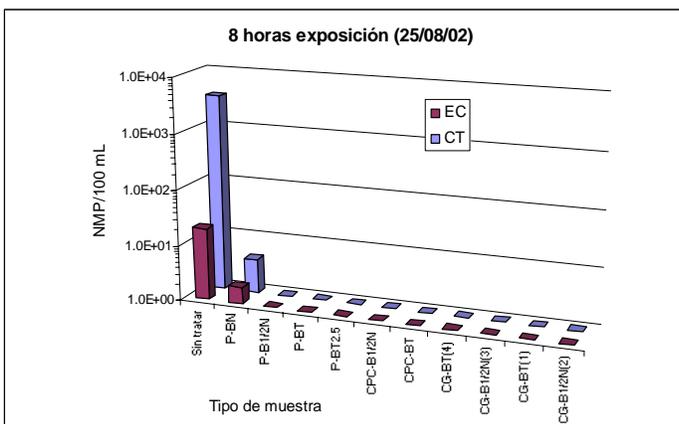
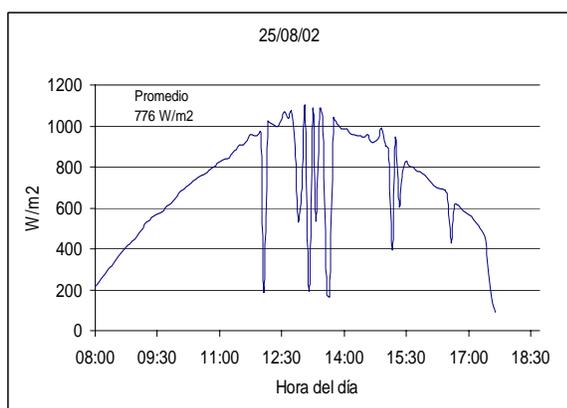
Figura 5. Contenido de Coliformes totales en las fuentes de abastecimiento de agua de la comunidad de estudio



(a)

(b)

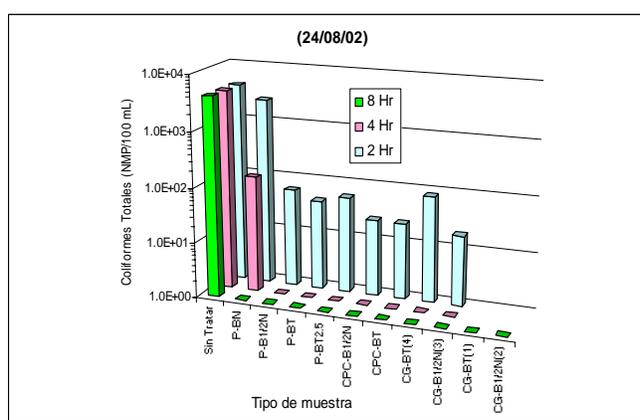
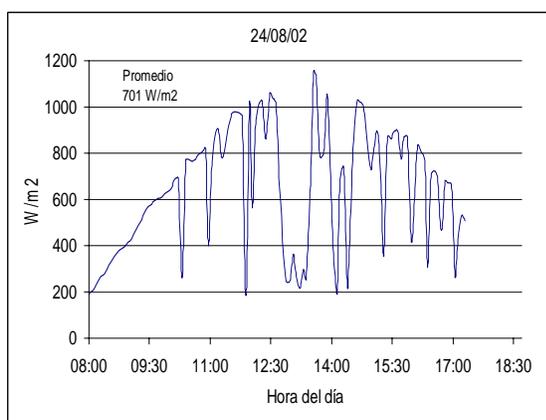
Figura 6 Día soleado: a) Intensidad de radiación medida durante el día y b) resultados de la desinfección después de 8 horas de exposición



(a)

(b)

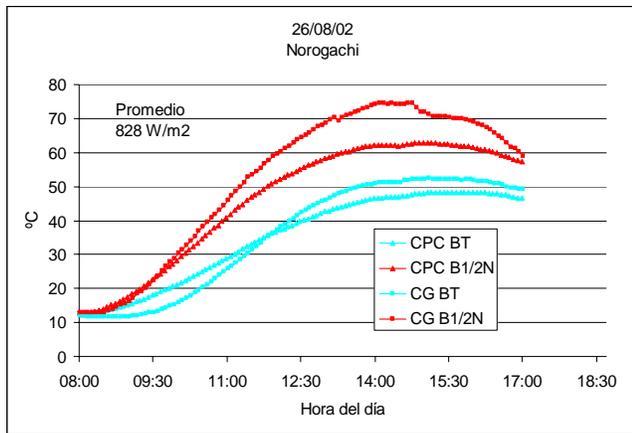
Figura 7 Día semi-nublado: a) Intensidad de radiación medida durante el día y b) resultados de la desinfección después de 8 horas de exposición.



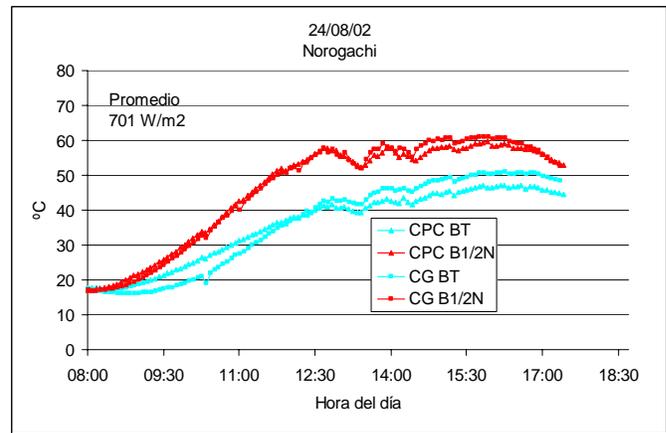
(a)

(b)

Figura 8 Día altamente nublado: a) Intensidad de radiación medida durante el día y b) resultado de la desinfección a las 2, 4 y 8 horas de exposición



(a)



(b)

Figura 9 Temperatura del agua dentro de las botellas puestas en el interior de los concentradores en días: a) soleado y b) nublado.

## CONCLUSIONES

Con respecto a la calidad del agua en la comunidad de estudio, solamente el 36% de las muestras de agua analizadas cumplieron con los límites permitidos por la Norma Oficial Mexicana para uso y consumo humano, lo que indica que es indispensable la implementación de algún sistema de desinfección del agua destinada a este fin.

La desinfección solar demostró ser efectiva en la eliminación de bacterias coliformes, mejorando la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento en la zona de estudio.

La medición de la temperatura del agua dentro de las botellas permite determinar que ésta no es el factor predominante para la eliminación de las bacterias, ya que los valores alcanzados por el agua contenida en las botellas transparentes dentro de los concentradores estuvieron aproximadamente 20 grados por debajo de los correspondientes a las botellas medio negras, pero aún así se obtuvieron resultados de desinfección similares.

Para desinfectar agua utilizando esta tecnología, tomando en cuenta las condiciones de radiación y calidad del agua encontradas en la zona monitoreada, se pueden utilizar las botellas directamente en el piso, siempre y cuando los días sean semi-nublados o totalmente soleados y se tengan más de cuatro horas de radiación intensa durante el día. Para días nublados, se recomienda utilizar botellas medio negras dentro de un concentrador solar.

## REFERENCIAS

- American Water Works Association, AWWA, (1999). Water Quality & Treatment. McGraw-Hill, Inc., Mexico City, Mexico, Fifth edition.
- Conroy R.M., Meegan M.E., Joyce T., McGuigan K. y Barnes J. (1999). Solar disinfection of water reduces diarrhoeal disease: an update. Arch Dis Child, Vol 81, No 4, p. 337-8.
- INEGI-XII Censo Nacional de Población y Vivienda. <http://www.inegi.gob.mx/estadistica/espanol>
- Márquez B. y Celada V. (1993). Uso de la Energía Solar en la Desinfección de Agua para Consumo Humano. XVII Semana Nacional de Energía Solar. Colima, México.
- Martín A., González A., Fonseca O., Cortés J.E., Rodríguez M., Vázquez S. y Montellanos L. (2000). Viabilidad técnico social de la desinfección solar. Informe Técnico para la Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México.
- McGuigan K.G., Joyce T.M., Conroy R.M., Gillespie J.B. y

Elmore-Meegan M. (1998). Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles: characterizing the bacterial inactivation process. J Appl Microbiol, Vol 84, No. 6, p. 1138-48.

Merchant D.L. y Cobble M.H. (1966). Mirror Solar Panels. Reimpreso de Solar Energy, Vol. 10, No 3.

Reed R.H. (1997). Solar inactivation of faecal bacteria in water: the critical role of oxygen. Lett Appl Microbiol, Vol. 24, No 4, p. 276-80.

SSA. Secretaría de Salud (2000). Modificación a la norma oficial 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, Diario Oficial de la Federación, México, p. 73-79.

Sommer B. (1995). Solar Water Disinfection: Impact on Vibrio cholerae and Faecal coliforms, Resultados del Taller organizado por: CINARA- Universidad del Valle, Cali, Colombia y EAWAG/SANDEC, Duebendorf Zuerich, Switzerland.

Tripapanagostopoulos Y., Souliotis M., y Nousia Th. (2002). CPC Type Integrated Collector Storage Systems. Solar Energy, Vol. 72, No 4, p. 327-350.

Wegelin M. (1999). Solar water disinfection through plastic bottles. SOURCE Bulletin, No.4.

Artículo publicado en la:

## ISES Latin America Regional Conference

International Solar Energy Society ISES  
Asociación Nacional de Energía Solar ANES  
Fideicomiso de Riesgo Compartido FIRCO

Guanajuato, Gto. México. Noviembre 8 – 12,  
2004



TONATIUH  
Deidad Solar

# CONGRESO MUNDIAL de Energía Renovable México 2004

**Energías Renovables en la  
Conservación del Ambiente  
y el Fortalecimiento de las  
Microcuencas**

Secretaría de Agricultura, Ganadería,  
Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación

**ISES  
Latin American  
Regional Conference**

Sociedad Internacional de Energía Solar  
Asociación Nacional de Energía Solar

## INFORMACIÓN GENERAL

**Guanajuato, Gto.**

Centro de Convenciones del 8 al 12 de Noviembre