

# Pasteurizador solar para la descontaminación microbiológica del agua

## Solar pasteurizer for the microbiological decontamination of water

Daniel Ricardo Delgado <sup>1\*</sup>, Claudia Patricia Ortiz<sup>2</sup>, Juan Diego Rodríguez Rubiano<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Grupo de Investigaciones GRIAUC Program de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Cooperativa de Colombia-Sede Neiva

<sup>2</sup> Grupo de Investigaciones en Seguridad y Salud en el Trabajo – FET programa de Administración de la Salud Ocupacional, Fundación Escuela Tecnológica de Neiva - Jesús Oviedo Pérez

<sup>3</sup> Programa de Ingeniería Industrial Universidad Antonio Nariño Sede Buganviles.

<sup>1</sup>danielr.delgado@campusucc.edu.co, <sup>2</sup>claudia\_ortizde@fet.edu.co, <sup>3</sup>juanrodriguezr@uan.edu.co

**Resumen**— Proponer soluciones para el suministro de agua potable en regiones semiáridas como la región norte del departamento del Huila-Colombia es de gran importancia. Además de la escasez de agua, la calidad química y biológica del agua es otra dificultad que se debe enfrentar. Los altos niveles de irradiación solar en esta región, hacen posible utilizar sistemas solares para el tratamiento del agua. En este documento, se utilizó un sistema pasteurizador solar automatizado para la descontaminación microbiológica del agua. Las principales características del pasteurizador solar son la autosuficiencia energética y la robustez, la capacidad de promover la descontaminación independientemente de la turbidez o el pH, la ausencia de producción de trihalometanos, control del tiempo de tratamiento y la ausencia de contaminación secundaria derivada de la mezcla de agua contaminada con agua en tratamiento. El sistema pudo tratar el agua en temperaturas preprogramadas e intervalos de tiempo de 3600 s a 55 °C; 2700 s a 60 °C; 1800 s a 65 °C; 900 s a 75 °C; y 15 s a 85 °C. El análisis microbiológico realizado (presencia/ausencia de coliformes totales y *Escherichia coli*) indicó la eficacia del sistema, por lo que es adecuado para el tratamiento del agua. Se encontró que la productividad es directamente proporcional a la irradiación acumulada. El pasteurizador puede tratar el agua comenzando en el nivel de irradiación solar de  $\geq 12.2$  MJ/m<sup>2</sup> para sistemas sin un intercambiador de recuperación de calor. El uso de un intercambiador de recuperación de calor en este sistema, para precalentar el agua en la entrada del colector, es de gran importancia puesto que induce un aumento en la productividad de aproximadamente el 50% (la productividad más alta alcanza 30 L en un día) y disminuye el nivel mínimo de irradiación solar 8.3 MJ/m<sup>2</sup>.

**Palabras claves**— Descontaminación microbiológica del agua,, Energía solar, Purificación solar de agua.

**Abstract**— Proposing solutions for potable water supply in semiarid regions such as department of Huila-Colombia is of great importance. In addition to the water shortage, the lack of chemical and biological quality in the water is another difficulty to be faced. Taking advantage of the high levels of solar irradiation in those regions, the use of solar systems for water treatment is possible. In this paper, an automated solar pasteurizer system was used for the microbiological decontamination of water. The main characteristics of the solar pasteurizer are energetic self-sufficiency and robustness, the ability to promote decontamination regardless of the turbidity or pH, absence of production of trihalomethanes, local biome preservation (Caatinga), control of treatment time and the absence of secondary contamination derived from the mixture of contaminated water with water in treatment. The system was able to treat the water in pre-programmed temperatures and time intervals of 3600 s at 55 °C; 2700 s at 60 °C; 1800 s at 65 °C; 900 s at 75 °C; and 15 s at 85 °C. The microbiological analysis performed (presence/absence of Total Coliforms and *Escherichia coli*) indicated the efficacy of the system, making it suitable for water treatment. It was found that productivity (batches' frequency) is directly proportional to accumulated irradiation. The pasteurizer is able to treat the water starting at the solar irradiation level of  $\geq 12.2$  MJ/m<sup>2</sup> for systems without a heat recovery exchanger. The use of a heat recovery exchanger in this system, to pre-heat the water at the collector's inlet, is of great importance because it induces an increase in productivity of approximately 50% (highest productivity reaching 30 L in a day) and lowers the minimum level of solar irradiation 8.3 MJ/m<sup>2</sup>.

**Keywords**— Microbiological decontamination of water, Solar energy, Solar water purification.

## 1. Introducción

El agua es uno de los recursos naturales más importantes necesarios para los seres humanos. La falta de este recurso es aún mayor en las regiones semiáridas de los países en desarrollo porque en esas áreas no existe un medio adecuado de suministro o distribución. Las principales fuentes de suministro de agua para la población local son: represas, escorrentías, pozos poco profundos y manantiales. Todos estos son susceptibles a la contaminación por microorganismos causante de enfermedades, entre los cuales los principales agentes patógenos son protozoos, virus y bacterias. El agua es consumida por la población a pesar de que no es apta para el consumo humano desde el punto de vista microbiológico o químico. En consecuencia, millones de muertes ocurren por causas infecciosas cada año[1] una tarea muy compleja en regiones semiáridas porque implica una gran extensión territorial, baja densidad demográfica, bajos niveles de electrificación rural y acceso limitado al agua. Ante este problema, el desarrollo de tecnologías para el tratamiento microbiológico del agua adquiere una importancia vital para estas comunidades remotas. Existen varios métodos aplicables para el tratamiento del agua, como la cloración, el filtrado, la ebullición, la radiación ultravioleta (UV) y la pasteurización. La descontaminación por cloración (halógeno oxidante) es uno de los tratamientos de agua más comunes. Su costo se considera bajo; está ampliamente disponible y es fácil de aplicar, y tiene la capacidad de descontaminación residual cuando se usa con un pequeño exceso de dosificación. Sin embargo, además de alterar el sabor del agua cuando entra en contacto con la materia orgánica, la cloración puede generar sustancias cancerígenas llamadas trihalometanos [2][3].

Los dispositivos de filtración, especialmente los hechos de manera artesanal, se han utilizado en muchos países en desarrollo. Sin embargo, cuando el filtro tiene una baja calidad debido a una porosidad inadecuada y la falta de limpieza y reemplazo regulares, elimina un bajo porcentaje de bacterias (aproximadamente 90%) incapaz de garantizar la potabilidad del agua para el consumo humano. En el caso del filtrado lento de arena (otra técnica de filtrado ampliamente utilizada), las propiedades del filtro dependen de una película biológica formada internamente, que es responsable de la

eliminación de aproximadamente el 98% de los patógenos transmitidos por el agua[4].

Uno de los métodos físicos que se han aplicado en áreas remotas para la descontaminación del agua es el tratamiento con radiación UV, que tiene un efecto biocida en los microorganismos. Debido a la falta de electrificación en estas regiones, la radiación UV utilizada proviene del sol. Este proceso desactiva las secuencias de ADN involucradas en la reproducción viral y bacteriana[5][6]. Para obtener buenos resultados en la descontaminación por radiación UV, el patógeno debe recibir una cierta dosis de irradiación durante un período de tiempo. Una reducción de 3 log de *Escherichia coli* requiere una fluencia cercana a 2000 kJ/m<sup>2</sup> dosis de radiación solar integrada en el rango de longitud de onda UVA y UVB. Sin embargo, la eficacia del tratamiento con UV está muy influenciada por la turbidez del agua y la cantidad de agregados de partículas sólidas en suspensión debido a la absorción o reflexión del fotón inducida por estas partículas[2][6].

Otro método físico que utiliza energía solar como agente activo para la descontaminación del agua es la pasteurización. Este método consiste en usar calor para destruir microorganismos patógenos. Padhye et al.[7], mostraron la susceptibilidad de *E. coli* a 60 °C durante una exposición de 45 min. La escuela de medicina de la Universidad de Utah mostró los resultados de la pasteurización con el protozoo *Giardia lamblia* a una temperatura de 60 °C durante 3 min. Harp et al.[8] demostraron que era posible desactivar los protozoos *Cryptosporidium parvum* (responsable de muchas enfermedades intestinales y respiratorias y gran cantidad de muertes humanas) calentando el agua durante 16 s a una temperatura de 71.1 °C. La pasteurización se considera el método más confiable y prometedor para la eliminación de patógenos en regiones semiáridas [9]. Destruye completamente los microorganismos responsables de la contaminación del agua con temperaturas inferiores al punto de ebullición del agua, independientemente de la turbidez y el pH, que influyen de manera significativa en otros métodos [10]. Así una alternativa adecuada y prometedor para aquellas regiones remotas, capaz de garantizar el tratamiento con eficiencia, además de no dañar el medio ambiente, son los sistemas solares de calentamiento de agua que realizan la pasteurización. Algunos sistemas solares que utilizan este método pueden presentar un atractivo costo-



se probó en cinco temperaturas diferentes (puntos de referencia): 55 ° C, 60 ° C, 65 ° C, 75 ° C y 85 ° C . Los tiempos de residencia utilizados para cada temperatura fueron: 3600, 2700, 1800, 900 y 15 s, respectivamente. Las elecciones de estos parámetros se basaron en la "Zona de seguridad" o "Zona de letalidad" para la inactivación de microorganismos patógenos (Figura 2) [7] [8][10].

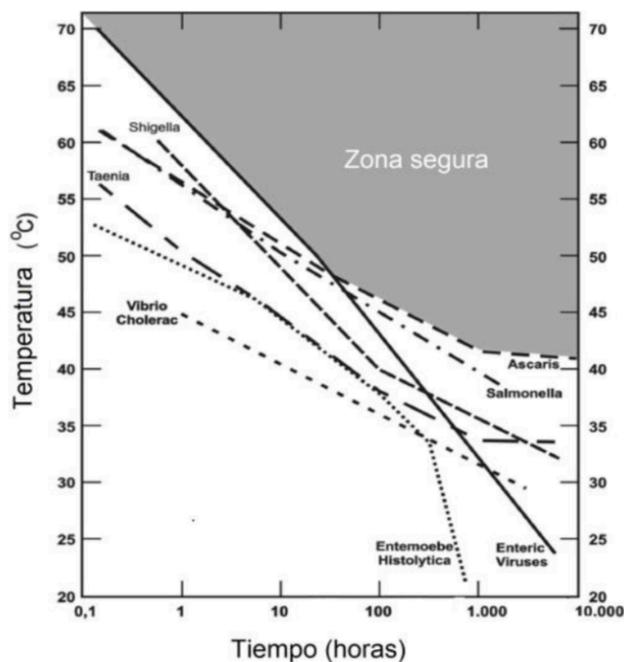


Figura 2. Curva de inactivación de microorganismos patógenos por pasteurización [13].

#### 2.4 Análisis microbiológico

Para verificar la efectividad de la descontaminación, se tomaron muestras de agua antes y después del tratamiento. Se depositó en el colector solar, donde 2 L de agua con la ayuda de un embudo previamente esterilizado. La salida del colector se trató con alcohol USP para evitar cualquier tipo de contaminación adicional. La muestra tomada después del tratamiento se llevó al laboratorio para el análisis microbiológico.

Todo el proceso, desde la recolección de agua contaminada hasta el análisis después del tratamiento, se realizó en un intervalo de 2 h. Este límite de tiempo es necesario para evitar discrepancias en el análisis a través de la recontaminación o la muerte de bacterias debido a la falta de nutrientes en el agua. Todas las muestras recolectadas fueron analizadas tanto por la presencia /

ausencia como por la cantidad de bacterias pertenecientes a grupos coliformes totales y E. coli.

### 3. Resultados y discusión

Para observar la efectividad de la pasteurización solar, se realizaron análisis bacteriológicos antes y después de cada lote. Antes del tratamiento, se ha encontrado por el método cualitativo que el agua estaba contaminada debido a la presencia de coliformes totales y E. coli . Después del tratamiento, la potabilidad del agua para consumo humano se confirmó mediante análisis cuantitativos de coliformes totales y E. coli, como se muestra en la Tabla 1 .

Tabla 1. Resultados de análisis bacteriológicos mediante la técnica de tubos múltiples, para agua antes y después del tratamiento con un sistema de pasteurización solar.

Condiciones experimentales		Parámetros microbiológicos			
Temperatura (°C)	Tiempo de residencia (s)	Coliformes Totales		<i>Escherichia coli</i>	
		Inicial	Final	Inicial	Final
55	3600	14,00	<2	250	<2
60	2700	14,00	<3	90	<4
65	1800	14,00	<1	40	<1
75	900	14,00	<1	40	<1

Se puede demostrar que la aniquilación de microorganismos patógenos se garantizó para todas las temperaturas de tratamiento preestablecidas y sus correspondientes tiempos de residencia. Otros estudios de investigación que utilizan energía térmica para la descontaminación microbiológica no realizaron análisis bacteriológicos para confirmar la efectividad del tratamiento[14].

Además de los análisis microbiológicos, los parámetros físico-químicos, como el pH y la turbidez también se observaron durante el experimento (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis de pH y turbidez del agua, como parámetros de purificación del agua para consumo humano.

Parámetros	Análisis de tratamiento			
	Inicial		Final	
	Min.	Max.	Min.	Max.
pH	7,23	7,54	7,67	8,65
Turbidez	4,13	7,43	3,34	6,67

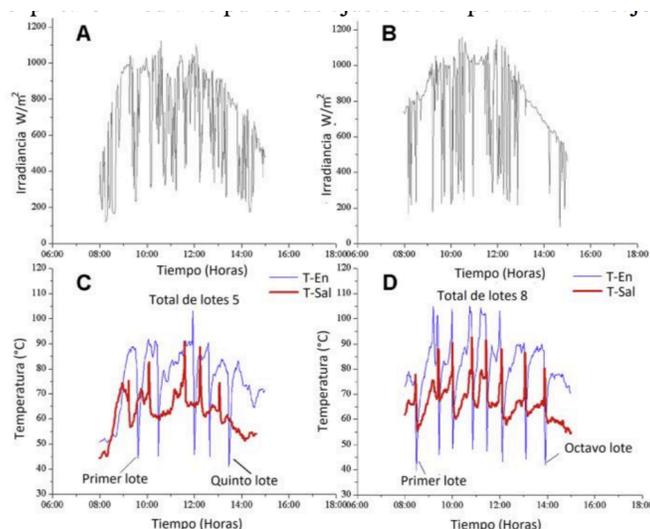
Los análisis indicaron que antes del tratamiento, el pH varió de 7,23 a 7,54, y después del tratamiento varió de 7,67 a 8,65. Todos los valores están en un rango entre 6.0 y 9.5, que son los valores recomendados por la Norma Técnica Colombiana[15]. Con respecto a la turbidez, se observó que el tratamiento fue capaz de reducir los valores nefelométricos. Aunque los valores no están dentro de los estándares requeridos por la NTC 4707[16]

Las temperaturas alcanzadas durante la pasteurización solar pueden influir en la reducción de la turbidez, ya que modifican la cantidad de gases disueltos en el agua, como el oxígeno, y en los procesos biológicos [17]. El agua cruda es rica en materia orgánica y contiene microorganismos patógenos. El empobrecimiento del oxígeno influye en las reacciones bioquímicas y la coagulación de las proteínas que constituyen la materia viva. La coagulación y la posterior precipitación o decantación de este material en suspensión conduce a una menor dispersión de los haces de fotones, lo que da como resultado un agua menos turbia. Otra consideración, en este caso hipotética, se refiere a la influencia térmica sobre la degradación de las estructuras del organismo en suspensión. Este proceso de tratamiento físico puede hidrolizar tales estructuras en partículas aún más pequeñas.

La Fig. 4 muestra el comportamiento del sistema sin un intercambiador de calor y la ocurrencia de lotes en las temperaturas preestablecidas. En esta figura, podemos ver la irradiancia instantánea y las variaciones de temperatura en los sensores de entrada y salida ( $T_{entrada}$  y  $T_{salida}$ ) en dos días diferentes de operación (A=17,2 MJ/m<sup>2</sup> y B=19,4 MJ/m<sup>2</sup>).

Los gráficos de temperatura de entrada y salida (Fig. 3 C y D) muestran la ocurrencia de lotes, caracterizados por la caída repentina de la temperatura de entrada ( $T_{entrada}$ ) en el momento de la descarga, formando un pico invertido y bien definido. Se observó que en esos días, la irradiancia variaba en diferentes intensidades y momentos (Figura 3 A y B), lo que influía en la frecuencia de los lotes y, en consecuencia, la productividad del sistema. En el presente diseño, el pasteurizador se configura con la entrada de agua contaminada en la parte superior del colector solar y la salida en la inferior (Fig. 1.) Por lo tanto, cuando el colector está lleno de agua, debido a las diferencias en densidad, la temperatura de entrada se mantiene más alta que la temperatura de salida, excepto cuando el sistema

se está cargando y descargando. En la Fig. 3 C, se observaron cinco lotes, mientras que en la Fig. 4 D, se contaron ocho lotes durante un día con mayor irradiación.



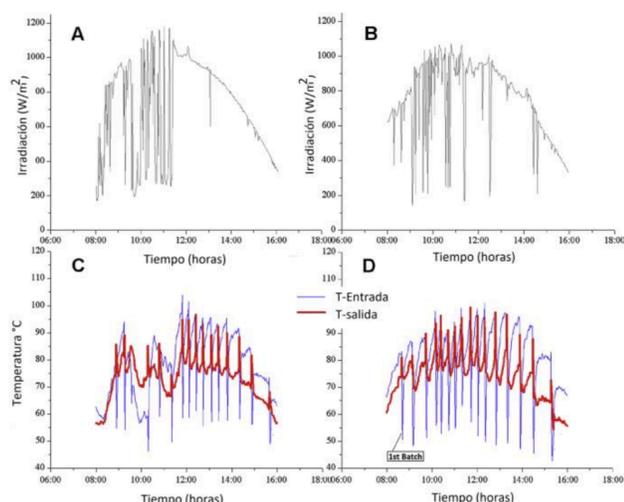
**Figura 3.** Irradiación (A y B) y variaciones de temperatura (C y D) en la entrada de los sensores ( $T_{entrada}$ ) y salida ( $T_{salida}$ ) en el sistema de pasteurización solar sin intercambiador de calor: irradiancias diarias acumulativas de 17,2 MJ / m<sup>2</sup> (A )

En la figura 3C, entre las 10:30 AM y las 12:00 PM, no hubo lotes, y las temperaturas se redujeron considerablemente debido a una caída en los niveles de irradiancia solar. De esta manera, una reducción en la frecuencia de los lotes y un aumento consecuente en el tiempo de residencia se verificaron y explicaron mediante puntos de ajuste de temperatura más bajos y un período de tratamiento más largo. Cuando se produce un lote y la secuencia de irradiancia permanece en niveles que garantizan el calentamiento, el siguiente lote ocurre con la misma temperatura de tratamiento. Es posible observar que los lotes que ocurrieron entre las 12:00 p.m. y las 13:30 p.m. se trataron con el "punto de ajuste" de 65°C, lo que demuestra que la temperatura del sistema permaneció por encima de los 65°C durante el tratamiento.

En la figura 3D, se observa que el primer lote ocurrió aproximadamente a las 8:30 AM y el último a las 2:00 PM. Ambos lotes ocurrieron con temperaturas más bajas que las que ocurrieron entre las 9:00 AM y las 12:00 PM, debido a la baja intensidad de irradiancia enfocada en el plano del colector.

La figura 4 muestra el comportamiento del sistema con un intercambiador de calor. Los datos se obtuvieron

en días en los que la irradiación acumulada fue 18,8 MJ / m<sup>2</sup> (figura 4 A) y 20,5 MJ / m<sup>2</sup> (figura 4 B).



**Figura 4.** Irradiancia (A y B) y variaciones de temperatura (C y D) en la entrada de los sensores ( $T_{\text{entrada}}$ ) y salida ( $T_{\text{salida}}$ ) en el sistema de pasteurización solar con un intercambiador de calor: irradiaciones diarias acumulativas de 18.8 MJ/m<sup>2</sup> (A) y 20.5 MJ / m<sup>2</sup> (B), resultando en quince lotes (C) y dieciocho lotes (D).

Fue posible verificar que las variaciones instantáneas de irradiancia en la mañana (las de la figura 4B fueron más pronunciadas que las de la figura 4A) lo que justifica la inhibición del tratamiento desde el comienzo del día (como se ve en la figura 4D) hasta aproximadamente las 9:30 a.m. Dieciséis lotes se contaron en la figura 4C, y 15 se contaron en la figura 4D, lo que indica una productividad similar para ambos días analizados.

Al comparar los resultados en la figura 3C (17.2 MJ/m<sup>2</sup> - cinco lotes) con la figura 4D (18.8 MJ/m<sup>2</sup>-15 lotes), y los resultados en la figura 3D (19,4 MJ / m<sup>2</sup> - ocho lotes) con la figura 4C (20,5 MJ / m<sup>2</sup> - dieciséis lotes), se observó que el uso de recuperación de calor promovió un aumento en la cantidad de lotes al influir en la frecuencia de los lotes durante un día completo de operación. En esta configuración, es posible observar que la mayoría de los lotes ocurrieron en "puntos de referencia" entre 65 °C y 75 °C.

#### 4. Conclusiones

El sistema fue probado con y sin el uso de un intercambiador de calor. El sistema de control desarrollado asegura que el agua en el tratamiento permanezca aislada del agua contaminada. Además,

permite la configuración de varias temperaturas de tratamiento (puntos de referencia) y el ajuste preciso de los tiempos de residencia correspondientes. Además, debido a que requiere un bajo consumo de energía durante la operación, el pasteurizador solar ha demostrado ser factible para el uso con energía fotovoltaica.

Con respecto al análisis bacteriológico, se demostró que el pasteurizador solar es eficaz para desactivar los indicadores de contaminación del agua (*E. coli* y coliformes totales) en las condiciones estudiadas de: 3600 s a 55°C; 2700 s a 60°C; 1800 s a 65°C; 900 s a 75°C; y 15 s a 85°C.

Se encontró que la productividad (frecuencia de lotes) es directamente proporcional a la irradiación acumulada. Comenzando con una irradiación solar crítica (8,3 MJ / m<sup>2</sup> y 12,2 MJ/ m<sup>2</sup> para sistemas con o sin intercambiador de calor, respectivamente), el pasteurizador estudiado puede tratar el agua con una productividad más alta que alcanza 30 L en un día. El intercambiador de calor en este sistema es de gran importancia porque induce un aumento en la productividad de aproximadamente 50%, mostrando el impacto del precalentamiento del agua de entrada en el colector.

Finalmente, se debe considerar que el pasteurizador solar tiene las ventajas de uso de no generar sustancias peligrosas, que no produzcan residuos, lo que está en perfecto acuerdo con el nuevo concepto del 'diseño respetuoso con el medio ambiente. Este concepto filosófico en investigación e ingeniería química fomenta procesos y productos que minimizan el impacto negativo en la salud humana y el medio ambiente.

#### 5. Agradecimientos

Agradecemos a la Dirección Nacional de Investigación y al Comité Nacional de Desarrollo de la Investigación de la Universidad Cooperativa de Colombia, por la financiación del Proyecto "Evaluación de modelos matemáticos para la estimación de la solubilidad de algunas sustancias para la industria farmacéutica y alimentaria en diferentes sistemas codisolventes con ID 1863".

#### 6. Referencias

- [1] WHO/UNICEF Joint Water Supply and Sanitation Monitoring Programme., World Health Organization., and UNICEF., Progress on drinking water and sanitation. 2012 update. UNICEF, 2012.

- [2] K. V. Ellis, "Water disinfection: A review with some consideration of the requirements of the third world," *Crit. Rev. Environ. Control*, vol. 20, no. 5–6, pp. 341–407, Jan. 1991.
- [3] S. T. Meyer, "O uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública," *Cad. Saude Publica*, vol. 10, no. 1, pp. 99–110, Mar. 1994.
- [4] C. Schulz, D. Okun, D. Donaldson, and J. Austin, "Surface water treatment for communities in developing countries," 1992.
- [5] A. Acra, M. Jurdi, H. Mu'Allem, and Y. Karahagopian, "Water disinfection by solar radiation: assessment and application," 1990.
- [6] B. Griese, B. Griese, J. Denney, T. Fleischmann, F. Pesaro, and A. Metzler, "Undeafated: how father and son triumphed over unbelievable odds both on and off the field," *J. Water Supply Res. Technol. AQUA*, vol. 43, no. 3, p. 243, 2000.
- [7] N. V. Padhye and M. P. Doyle, "Escherichia coli O157:H7: Epidemiology, Pathogenesis, and Methods for Detection in Food," *J. Food Prot.*, vol. 55, no. 7, pp. 555–565, Jul. 1992.
- [8] J. A. Harp, R. Fayer, B. A. Pesch, and G. J. Jackson, "Effect of pasteurization on infectivity of *Cryptosporidium parvum* oocysts in water and milk.," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 62, no. 8, pp. 2866–8, Aug. 1996.
- [9] American Solar Energy Society., *Proceedings of the ... National Passive Solar Conference*. American Solar Energy Society, 1984.
- [10] J. Burch and K. E. Thomas, "An Overview of Witter Disinfection Potential for Solarl?fhermal Water," 1998.
- [11] E. Valenzuela et al., "Water disinfection by solar radiation in a green house effect device," *Int. J. Glob. Warm.*, vol. 2, no. 1, p. 48, 2010.
- [12] "Atlas Interactivo - Radiación IDEAM." [Online]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>. [Accessed: 07-May-2018].
- [13] R. G. Feachem, *Sanitation and disease: health aspects of excreta and wastewater management*. Published for the World Bank by Wiley, 1983.
- [14] T. S. Saitoh and H. H. El-Ghetany, "A pilot solar water disinfecting system: performance analysis and testing," *Sol. Energy*, vol. 72, no. 3, pp. 261–269, Mar. 2002.
- [15] Instituto Colombiano de Normas Técnicas, "NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 4803." Bogota D.C., 2016.
- [16] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, "NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 4707." Bogota D.C, 1999.
- [17] E. Mendiondo, "Limnologia by J G Tundisi and T Matsumura Tundisi," *Brazilian J. Biol.*, vol. 69, no. 1, pp. 229–229, Feb. 2009.