

Diagnóstico de un tratamiento solar para remoción de bacterias coliformes en el agua

Henry Tahofik Polanco Arita

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2017

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Diagnóstico de un tratamiento solar para remoción de bacterias coliformes en el agua

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Henry Tahofik Polanco Arita

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2017

Diagnóstico de un tratamiento solar para remoción de bacterias coliformes en el agua

Henry Tahofik Polanco Arita

Resumen. El agua para consumo humano es de gran relevancia para la salud poblacional; sin embargo, asegurar la eficiencia de los procesos de potabilización es una constante problemática. El tratamiento solar representa una alternativa que aprovecha el espectro UV e infrarrojo de la radiación solar para la desinfección de agua. Estudiantes de la Universidad de Halmstad construyeron un prototipo, cuyo desempeño fue verificado a través de la presente investigación. Se ejecutaron cuatro campañas de desinfección, tomando muestras en la entrada y salida del sistema para evaluar la eficacia en la remoción de bacterias coliformes. El dispositivo se operó bajo las condiciones climáticas de la Escuela Agrícola Panamericana, verificadas durante los meses de julio a septiembre. El agua de ingreso al sistema fue inoculada con una carga promedio de 10^2 UFC/100 mL de coliformes totales provenientes de una fuente local. Las muestras se sometieron a períodos de retención hidráulica entre uno hasta tres días. Las cargas microbianas del agua fueron cuantificadas aplicando el método de filtración de membrana y el reactivo m-Colibblue24[®]. Adicionalmente, se registraron las condiciones asociadas al desempeño del proceso de desinfección, como temperatura del agua e irradiación solar durante los diferentes ciclos de desinfección. Los resultados del estudio reflejan que el sistema de tratamiento fue capaz de eliminar en su totalidad la población de bacterias coliformes, al operar con un período de retención superior a dos días. Los resultados muestran que el comportamiento del sistema se encuentra directamente relacionado con la radiación solar disponible.

Palabras clave: Agua potable, desinfección, filtración de membrana, prototipo.

Abstract. Access to safe drinking water is a fundamental human need; however, ensuring the efficiency of purification processes is a constant problem. The solar treatment represents an alternative that takes advantage of the UV and infrared spectrum of the solar radiation for the disinfection of the water. Students of the University of Halmstad built a prototype, whose performance was verified through this investigation. Four disinfection campaigns were carried out, taking samples at the system inlet and outlet to evaluate the efficiency in the removal of coliform bacteria. The device was operated under the climatic conditions of the Panamerican Agricultural School, from July to September. Inflowing water to the system was inoculated with an average load of 10^2 CFU / 100 mL of total coliform bacteria taken from a local source. The samples were treated using periods of hydraulic retention between one and three days. The microbial concentration of the water were quantified using the membrane filtration method and the m-Colibblue24[®] reagent. The conditions associated to the performance of the disinfection process were also registered, such as water temperature and solar irradiation during the different disinfection cycles. The results of the study reflect that the treatment was able to eliminate the population of coliform bacteria, when operating with a retention period above two days. The results show that the behavior of the system is directly related to the solar radiation availability.

Key words: Disinfection, drinking water, membrane filtration, prototype.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	4
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
4. CONCLUSIONES.....	15
5. RECOMENDACIONES.....	16
6. LITERATURA CITADA.....	17
7. ANEXOS	20

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Dimensiones de las tuberías.	5
2. Dosificación de carga de coliformes.	9
3. Descripción de campañas de muestreo.	10
4. Eficiencia de desinfección a lo largo del estudio.	12

Figuras	Página
1. Mapa de ubicación del estudio.	4
2. Esquema del sistema de desinfección.	6
3. Diseño experimental y flujograma para cada ciclo de muestreo.	7
4. Metodología para control de los TRH.	7
5. Carga de coliformes en el agua de entrada al sistema, durante todo el experimento.	11
6. Carga de coliformes en el agua tratada durante todo el experimento.	12
7. Relación entre condiciones para la desinfección en las repeticiones con inactivación exitosa de coliformes totales.	13
8. Influencia de la irradiación promedio diaria en porcentaje de desinfección del agua tratada a lo largo de estudio.	14

Anexos	Página
10. Empaques, tubería flexible de PVC y tubería de policarbonato.	20
11. Módulo de desinfección ensamblado.	21
12. Válvula de entrada de agua y de muestreo.	21
13. Materiales para metodología de filtración por membrana.	22

1. INTRODUCCIÓN

El agua para consumo humano puede ser contaminada distintos organismos que representan un riesgo para la salud humana. Esta contracción de patógenos en el agua se puede dar por la mala aplicación de prácticas higiénicas o la ausencia de las mismas, así mismo incorrecto almacenamiento y distribución. El humano puede tener contacto con estos organismos a través del consumo directo o indirecto del agua (Meierhofer y Wegelin, 2003).

La contaminación del agua destinada para el consumo humano es un factor determinante en la salud de la población, ya que es la causante de variedad de enfermedades gastrointestinales que afectan a millones de personas al año e incluso producen a la muerte (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2004). Entre estas enfermedades se encuentran las diarreas, las cuales según Montes et al. (2001) y el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) (2016) son de las principales causas de mortalidad infantil en Honduras. En algunos casos los sistemas de tratamiento y purificación del agua no son lo suficiente eficaces en la remoción de patógenos (Quijada, 2015).

Según Gleick (1996) el ser humano necesita como mínimo 50 L por persona al día para cumplir sus necesidades más básicas, incluyendo consumo. Según Chenoweth (2008) se requieren al menos 85 L de agua, para tener una buena calidad de vida. En Honduras el promedio de habitantes por hogar es de 4.8 personas. En términos de consumo, una persona de 70 kg en la zona tropical debería consumir de 4.1 a 6 L de agua al día. Entonces el consumo mínimo por hogar debería estar entre 19.7 y 28.8 L de agua potable a diario (Arriagada, 2002; Grandjean, 2004). De acuerdo a el agua debe estar totalmente libre de organismos pertenecientes al grupo de coliformes y coliformes fecales (Pontius y American Water Works Association [AWWA], 1990). Bajo la definición de la OMS (2017), el agua potable es aquella que se utiliza a nivel doméstico para desarrollar distintas actividades, entre estas el consumo. Además, debe estar al menos a un kilómetro de distancia.

La búsqueda de alternativas para mejorar la situación del recurso hídrico para consumo humano, se ha vuelto más exhaustiva (Malato et al., 2009). Se han presentado diferentes tecnologías haciendo uso de energías renovables como respuesta a la problemática y como medidas de adaptación al cambio climático, algunas de estas con resultados muy positivos, pero en general con una deficiencia de información respaldada sobre su desempeño.

La práctica del uso de energía solar para el tratamiento de agua es verídica y posee un trasfondo de aplicaciones a lo largo de la historia (Ahmed, 2016). Esto colabora a las estrategias de desarrollo con punto de vista sostenibles. Según el estudio de Konersmann y Frank (2009), dado el relativamente bajo consumo de agua en pequeñas comunidades y que este tipo de sistemas de tratamiento son versátiles y de bajo costo, es posible introducir la tecnología de desinfección solar en zonas rurales, de bajo ingreso económico y disponibilidad de agua potable es muy baja.

Un gran porcentaje de las investigaciones relacionadas a la metodología de desinfección solar, ha utilizado la remoción de *E. coli* como microorganismo indicador de la eficacia en el proceso de tratamiento. La mayoría de los estudios reflejan resultados positivos en la inactivación de este microorganismo. Además, se ha demostrado como el tratamiento térmico de estos sistemas es capaz de inactivar otros patógenos que pueden estar presentes en el agua como *Salmonella*, *Vibrio cholerae* o *Shigella* (Burch y Thomas, 1998). Cabe mencionar que los resultados de las diferentes investigaciones pueden variar a causa de las condiciones climatológicas y geográficas el sitio de estudio (Konersmann y Frank, 2009; McGuigan, Joyce, Conroy, Gillespie y Elmore-Meegan, 1998).

El espectro de luz está compuesto por una serie de emisiones de energía a diferentes longitudes de onda (Cejkova et al., 2004). El concepto básico de desinfección solar térmica toma protagonismo en dos puntos a lo largo de las longitudes de onda dentro del espectro de luz. En primer lugar, en el espectro de luz se encuentra la radiación infrarroja. La amplia longitud de onda permite elevar la temperatura entre 70-75 °C, superando así la tolerancia de los microorganismos patógenos. En segundo lugar y el más importante es el espectro de rayos UV. La corta longitud de onda presente en este espectro, hace que las emisiones del mismo sean muy dañinas para las cadenas de ácidos nucleicos de los microorganismos (Sinha y Häder, 2002). Este mismo principio actúa sobre la cadena de ARN en los virus, logrando así inactivarlos (Meierhofer y Wegelin, 2003).

La eficiencia de este proceso de desinfección puede ser influenciada tanto por factores ambientales, como por características de los diferentes diseños para el sistema de desinfección. De acuerdo al estudio de Wegelin et al. (1994), se requieren 324 W/m² de radiación UV-A (radiación cercana) para que exista una reducción de microorganismos en el agua. Se han obtenido resultados de desinfección de agua con una carga microbiana de hasta 10⁵ UFC de *E. coli*, luego de un tiempo de exposición de cinco horas con una irradiación de 555 W/m² (Martín-Domínguez, Alarcón-Herrera, y González-Herrera, 2005).

Existen diferentes estudios sobre desinfección solar térmica, con diferentes eficacias en la remoción de coliformes totales, con tiempos de exposición de 1 - 8 horas (McGuigan et al., 1998; Meyer y Reed, 2004). Sin embargo, algunos modelos de sistema de tratamiento han sido capaces de inactivar cargas bacteriológicas en un periodo de tiempo entre 20 – 60 minutos, bajo condiciones de irradiación y carga bacteriana similares (Caslake et al., 2004). Además, se ha logrado observar que las grandes concentraciones de microorganismos, especialmente el *E. coli* presentaron mayor resistencia al mismo experimento en relación con otros organismos presentes en el agua.

En el año estudiantes de la Universidad de Halmstad desarrollaron un sistema de desinfección solar, construyendo su prototipo a escala piloto en la Escuela Agrícola Panamericana (EAP). Este sistema de purificación de agua fue creado con el objetivo de distribuirlo en distintos territorios donde la disponibilidad de agua potable es baja. Se encuentra diseñado para operar con flujo continuo, totalmente automático y utiliza únicamente la radiación solar para su operación. Desde su ensamblaje y puesta en marcha en la EAP, el sistema no operó con forme a su diseño automatizado original, presentando múltiples fugas de agua y daños en controladores y válvulas. Sin embargo, para verificar si el prototipo conceptual puede ser adaptado como alternativa de tratamiento para agua de consumo, se condicionó el dispositivo para su operación manual por lotes, planteando los siguientes objetivos para la evaluación de su desempeño:

- Determinar la eficiencia de reducción de coliformes en el agua que ingresa al sistema utilizando diferentes cargas bacterianas.
- Identificar las variables de operación que incrementan la eficiencia de remoción de coliformes por medio del sistema de tratamiento.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del estudio.

El estudio se llevó a cabo en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano (EAP), en coordenadas específicas de 499733.49 m E y 1549409.08 m N en unidades UTM (Universal Transversal Mercator). El sistema fue ensamblado y operó en la parte trasera del edificio del Departamento de Ambiente y Desarrollo, inmediato al parque solar de la EAP. La temperatura promedio para la zona es de 24.1 °C y con un promedio anual de radiación horizontal de 5.07 kWh/m²/ día (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2017).

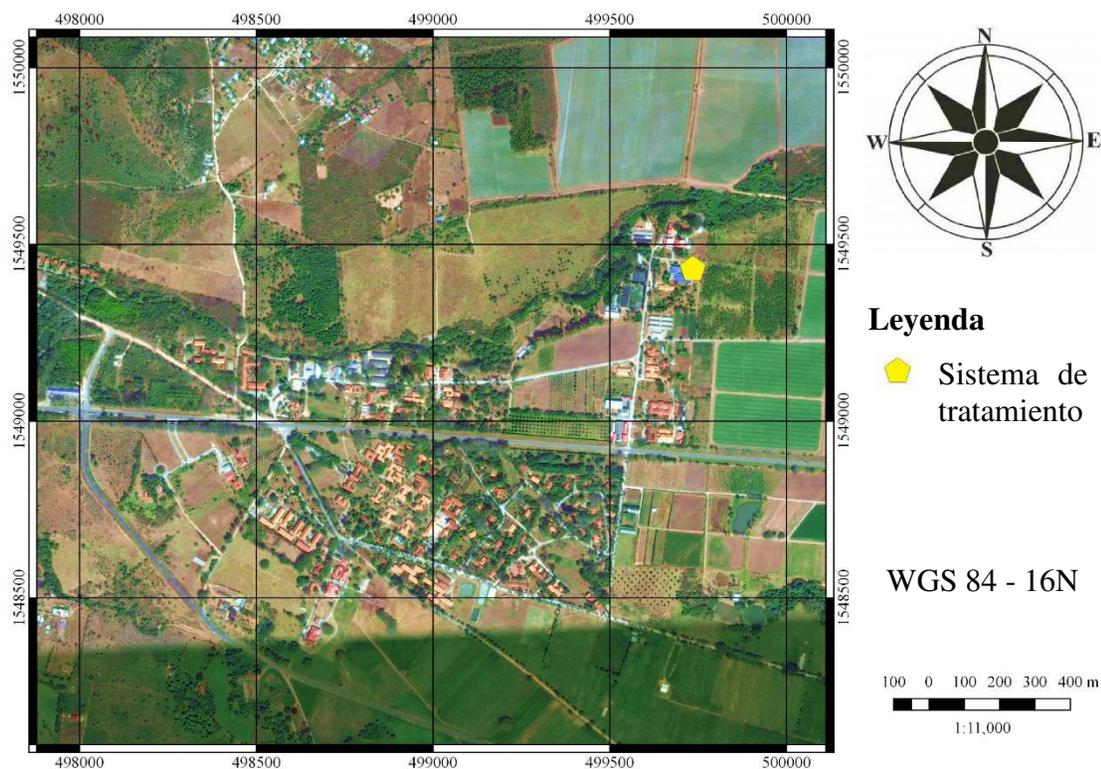


Figura 1. Mapa de ubicación del estudio.

Construcción y puesta en marcha del sistema.

Todo el montaje se basó en el diseño generado por los estudiantes de la Universidad de Halmstad para su sistema de desinfección solar automático. La modificación más relevante para su adaptación al experimento, fue cambiar la naturaleza de flujo continuo a lotes. El módulo de desinfección fue ensamblado conectando 20 tubos de policarbonato facilitando el flujo de agua en forma de zigzag a lo largo del mismo (Figura 2). Para la conexión entre tuberías se empleó conductos PVC flexible asegurados con anillos de goma como empaques para evitar cualquier fuga de agua. La dimensión de la tubería se describe en el Cuadro 1. El módulo de desinfección se posicionó con una leve inclinación a favor de la salida del mismo, que favorezca el flujo de agua por el circuito. Para lograr el ingreso del agua al módulo de desinfección, se ubicó un reservorio de agua sobre el techo de un edificio cercano a 3.4 m de altura, facilitando el flujo por gravedad.

El sistema se operó por medio de una válvula principal ubicada en la entrada del módulo de desinfección adjunta a una segunda válvula en forma de “T” utilizada para la toma de muestras previo al ingreso al módulo de desinfección. Finalmente se instaló una tercera válvula que impide el reflujó del agua tratada, evitando cualquier contaminación que pudo tener la misma al salir del sistema.

Cuadro 1. Dimensiones de las tuberías.

	Tubería de policarbonato	Tubería flexible
Longitud	1.0 m	18.5 cm
Diámetro	3.0 cm	2.4 cm
Grosor	2.0 mm	

La operación del sistema fue a través la manipulación de la válvula de entrada. Durante la puesta en marcha, el volumen agua contaminada se introduce en el reservorio de entrada. Luego, el agua es canalizada por una manguera hacia el sistema de desinfección. Una vez transcurrido el tiempo de retención hidráulica (TRH) del agua, esta sale del sistema desinfectada (Figura 2). El TRH es el periodo que el agua permanece dentro del módulo de desinfección y es la variable de control durante el experimento, permitiendo su variación conforme a las necesidades de desinfección.

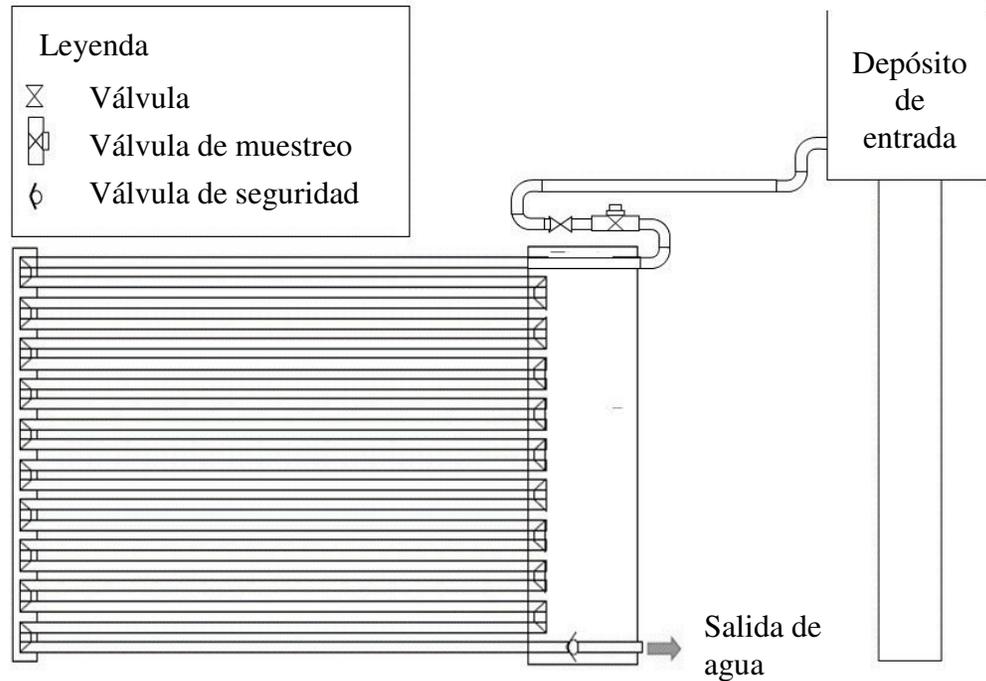


Figura 2. Esquema del sistema de desinfección.

Metodología de ensayo.

El estudio se dividió en cuatro campañas de desinfección con diferentes TRH (Cuadro 3), cada una con siete muestreos, con excepción de la última campaña la cual tuvo cinco repeticiones. Se muestreo en la entrada y en la salida del sistema de desinfección. Esto resultó en 52 muestras para el análisis. Cada muestreo siguió el flujo de proceso descrito en la Figura 3.

El volumen de agua que ingresa diariamente al sistema determina el TRH; cada lote de desinfección del agua inoculada es introducido al sistema con carga de bacterias coliformes previamente estimadas. Para llegar a cumplir con el TRH de dos días y lograr muestras diarias, se ingresó el 50% de la capacidad de volumen del sistema con agua inoculada. De esta manera la primera mitad del volumen (segundo lote) del sistema contuvo agua con un TRH 24 horas menor que la segunda mitad (primer lote). Así mismo para un TRH de tres días, se ingresó el 33% del volumen y se siguió la misma metodología, llegando a tener tres lotes dentro del sistema. Para manejar estas cantidades de agua de alimentación, el reservorio de entrada fue graduado con diferentes volúmenes de interés (Figura 4).

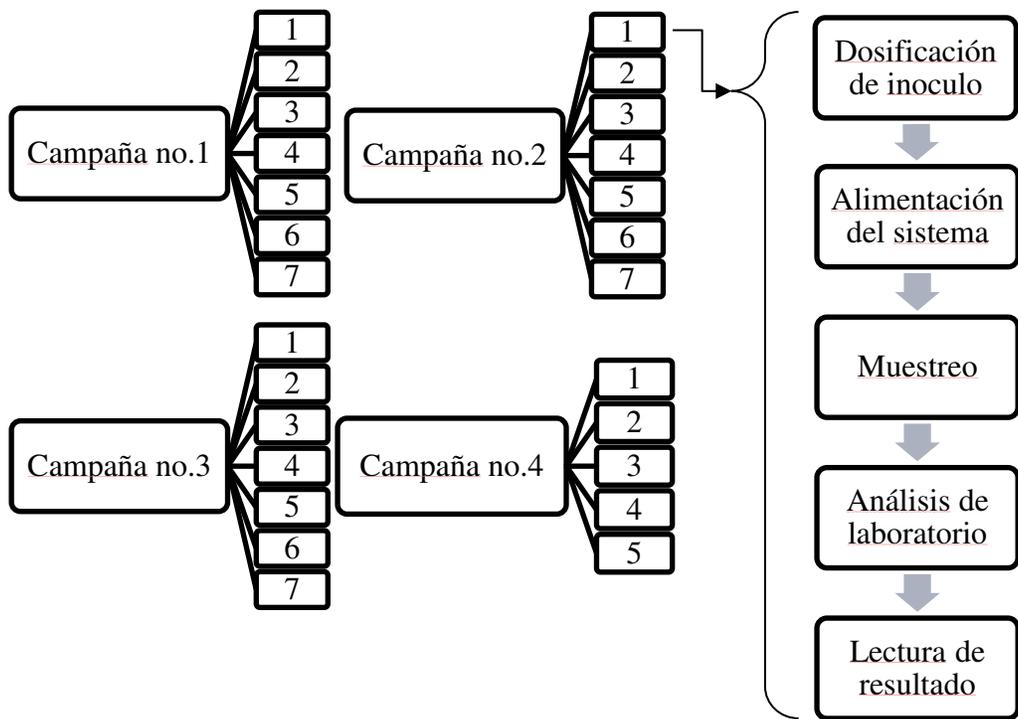


Figura 3. Diseño experimental y flujograma para cada ciclo de muestreo.

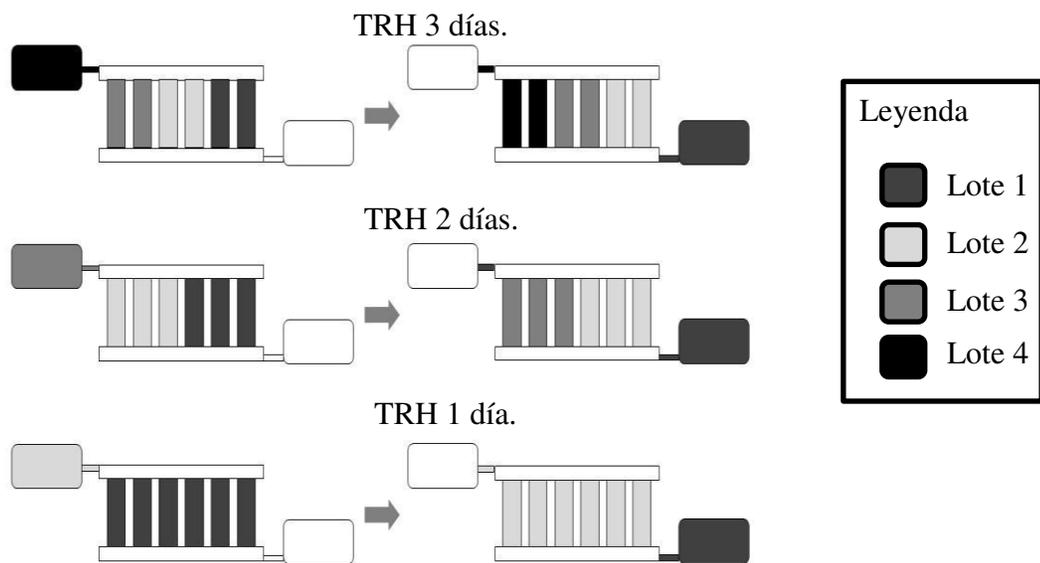


Figura 4. Metodología para control de los TRH

Para la toma de muestras se utilizaron botellas plásticas previamente lavadas y desinfectadas con alcohol. Cada muestra se identificó utilizando seis dígitos que correspondientes al punto de muestreo, el TRH, la carga de coliformes y el número de muestra. El sistema fue muestreado en dos puntos: en la válvula “T” previa a la entrada al módulo de desinfección (agua inoculada), y en el tanque de salida (agua tratada).

Cada día se tomaron dos muestras, una con TRH 0 días (entrada) y una segunda con mayor TRH (salida), dependiendo de la campaña de desinfección. Las muestras fueron ingresadas al Laboratorio de calidad de agua de Zamorano para su análisis. Se empleó la metodología de “Standard Methods for the examination of water and wastewater” de filtración de membrana, con filtro de 0.45 μm , para 100 mL de muestra (American Public Health Association, 2005). Luego se preparó el reactivo m-Colibblue24 dentro de un plato Petri estéril con membrana absorbente, para ser incubadas por 24 horas a una temperatura de $35 \pm 0.5^\circ\text{C}$ (HACH, 2017).

Preparación de lote de agua para alimentación del sistema.

Caracterización del inocular. De acuerdo al estudio de Quijada (2015) existe una carga microbiana entre $10^1 - 10^2$ UFC/100 mL en el sistema de agua público y en pozos privados en diferentes comunidades rurales de Honduras. Para el desarrollo del experimento se llevó a cabo una investigación exploratoria sobre el aporte de la carga microbiana de una fuente de agua accesible, que sirviera posteriormente como inóculo, previa al experimento. Se seleccionó la laguna de la unidad de acuicultura en Zamorano determinando la carga de coliformes presente. En promedio se obtuvo que el contenido de bacterias coliformes fue de 1,275 UFC (10^3 UFC/100 mL) y una turbidez de 31.3 UNT.

Se consideró la turbidez como un factor importante en la eficiencia del proceso de desinfección. Ya que para la aplicación eficaz de este tipo de tratamientos se requiere <30 UNT para llegar a tener desinfección del agua (Caslake et al., 2004; Martín-Domínguez et al., 2005). Este parámetro fue controlado para el desarrollo de los ensayos.

Agua base para el inocular. El agua utilizada para la desinfección provino de un almacenamiento subterráneo dedicado únicamente para recolección de agua lluvia. Esta agua no lleva ninguna clase de tratamiento de desinfección que pueda influir con el desarrollo de los microorganismos, determinando una carga bacteriana de 63 UFC (10^1 UFC/100 mL) y turbidez de 1.1 UNT. Otros estudios muestran eficacia de inactivación de cargas de coliformes de 10^3 UFC/100 mL (Carielo da Silva, Tiba y Calazans, 2016; Dejung et al., 2007). En base a los resultados de la fuente de agua contaminada, se inoculó agua lluvia buscando llegar a la densidad promedio de carga microbiana entre $10^1 - 10^2$ UFC/100 mL. Para obtener las cargas de coliformes deseadas en el agua que ingresó al sistema, se mezcló conforme a la carga previamente obtenida en el inocular.

Volumen de ingreso al tratamiento. En cuanto al volumen total del sistema. La conexión de la manguera en el tanque deja un volumen de 6.5 L que no llegan al sistema (Figura 2). Además, el volumen de agua contenido en las mangueras es de 2.5 L. Estableciendo un factor de seguridad de 2 L en caso de cualquier pérdida, concluyen en 11 L de agua que no es tratada en el sistema por cada lote de desinfección. El módulo de tratamiento tiene una capacidad de 14.2 L dividida entre los 20 tubos. Este volumen fue determinado específicamente para el área efectiva para desinfección. Considerando la totalidad de agua que entra en contacto con el sistema de desinfección, el volumen total es de 25.2 L.

La preparación del lote de 25.2 L para ingreso al sistema, requirió de un total de 200 mL de inóculo para obtener una carga de bacterias coliformes entre 10^1 - 10^2 UFC/100 mL. Además, este proceso resultó en una turbidez de 4.3 NTU en el agua para desinfección. Se preparó un nuevo lote para cada ciclo de tratamiento. En base a esta determinación se establecieron las dosificaciones para los diferentes TRH (Cuadro 2).

Cuadro 2. Dosificación de carga de coliformes.

	TRH 1 día	TRH 2 días	TRH 3 días
	10^2 UFC/100 mL	10^2 UFC/100 mL	10^2 UFC/100 mL
Volumen en el tanque	25.2 L	18.7 L	15.7 L
Volumen neto [¶]	14.2 L	7.1 L	4.7 L
Inoculo	200.0 mL	100.0 mL	50.0 mL

¶ Volumen de agua que ingresa al módulo de desinfección.

Influencia de las condiciones de operación en la remoción de coliformes.

Con la finalidad de determinar el comportamiento óptimo del sistema, se consideraron las diferentes condiciones de operación de relevancia para el proceso de desinfección. Se considerando cinco variables dentro del estudio.

Irradiación de la zona. Esta condición representa la energía a la que fue sometida el agua dentro del sistema, la cual es requerida para eliminar los microorganismos. Los datos de irradiación fueron obtenidos del parque solar aledaño al sistema. Calculando a partir de valores horarios, el total de W/m^2 día aplicando la regla de Simpson.

Temperatura del agua tratada. Esta variable actuó como indicador de la cantidad de energía que fue absorbida por el agua. Los valores fueron obtenidos, en unidad de °C, a través de mediciones en laboratorio inmediatamente posterior al muestreo del agua.

Carga de coliformes de entrada. En esta variable tuvo cierto grado de control a través del proceso de inoculación en el reservorio de entrada. Se determinaron los valores a través de la metodología de conteo de bacterias coliformes ya descrita y expresó en UFC/100 mL.

Tiempo de Retención Hidráulico. El periodo de residencia en el sistema en el que fue sometido a la radiación solar. Esta variable fue la de mayor control dentro del estudio. Se manejaron los diferentes TRH a través de la cuantificación del volumen de entrada al sistema. Los TRH para cada campaña están descritos en el Cuadro 3.

Carga de coliformes del agua tratada. Esta variable es la única variable de respuesta que posee el estudio. Determinó la eficiencia de remoción de bacterias en el agua una vez sometida a los tratamientos. El indicador utilizado para verificar la correcta operación del tratamiento fue la ausencia de bacterias coliformes en el agua tratada. Se siguió la misma metodología de conteo de bacterias coliformes y se expresó en UFC/100 mL.

Cuadro 3. Descripción de campañas de muestreo.

Número de campaña	TRH (días)
1	2
2	3
3	2
4	1

Análisis de resultados.

La base de datos generada se analizó aplicando estadística descriptiva. En primer lugar, se comparó los promedios de UFC del agua de entrada y la del agua tratada. A través de gráficos de barras se identificó la diferencia entre la carga en los dos puntos de muestreo. De esta manera se determinó si el sistema es capaz de reducir la carga bacteriana que ingresa al sistema. Por otro lado, se establecieron regresiones entre las condiciones ambientales y el porcentaje de remoción de coliformes, esto con el objetivo de determinar si existe una relación lineal entre estas variables. Además, se identificaron los eventos en donde se presentó remoción total de los coliformes y se identificaron las diferentes condiciones presentes, con la finalidad de establecer la combinación de factores que permiten un óptimo proceso de desinfección.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Alimentación del sistema.

En cuanto al agua inoculada que se ingresó al sistema, a lo largo del experimento se mantuvo dentro del rango de 10^1 – 10^2 UFC/100 mL de coliformes totales, expresado en la Figura 5. La carga de coliformes se mantuvo dentro del rango de UFC a pesar de la carencia de control en el agua base para inculo.

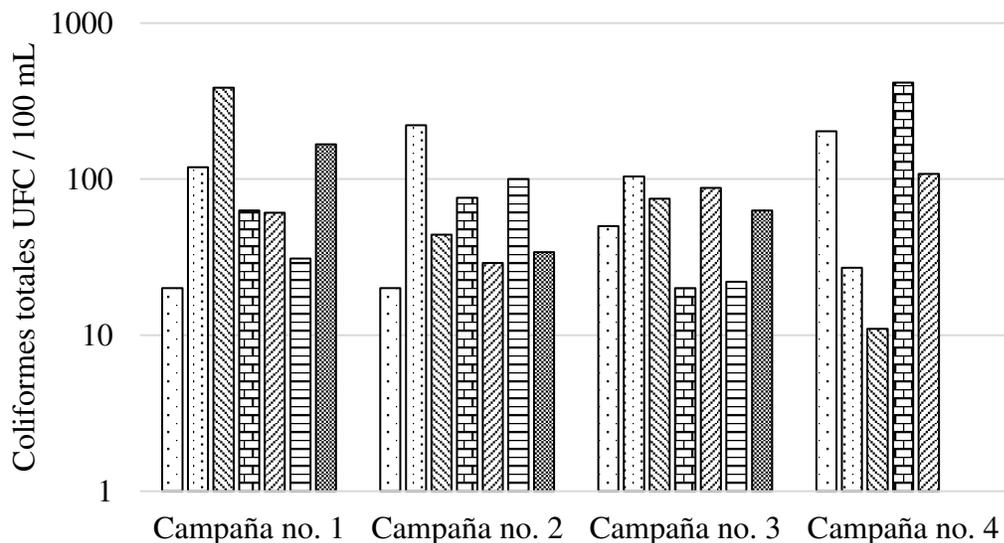


Figura 5. Carga de coliformes en el agua de entrada al sistema, durante todo el experimento.

Reducción de carga bacteriológica.

En cuanto al agua tratada, se puede apreciar en la Figura 6 como se comportó la carga bacteriana luego del pasar por el sistema. La segunda campaña evidencia un 85.71% (n= 6) de las muestras en donde se inactivo por completo el desarrollo de coliformes totales, en un TRH de tres días, representando el mayor nivel de desinfección en todo el experimento. La tercera campaña presento un 71.43% (n=5) de inactivación de coliformes en un periodo de TRH de dos días. Finalmente, la cuarta y última campaña de desinfección, con un TRH de un día logro un 60.00% (n=3) de muestras sin actividad de coliformes. En cambio, la primera campaña no llego a desinfectar ninguna de las muestras en su totalidad. Esto nos indica el tratamiento menos eficaz para el proceso de desinfección, dentro del experimento. Además, en el Cuadro 4 se describen el porcentaje de desinfección para todos los muestreos del estudio.

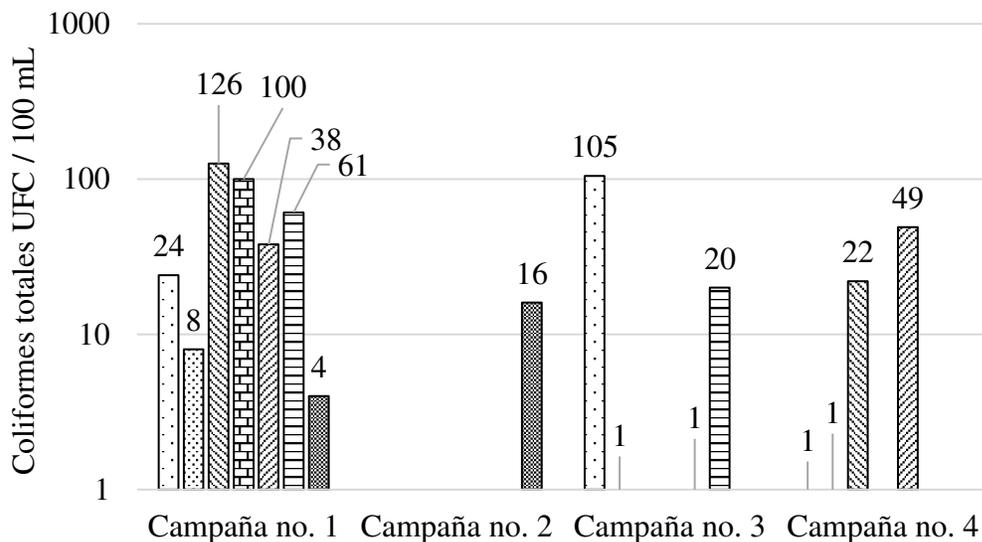


Figura 6. Carga de coliformes en el agua tratada durante todo el experimento.

Cuadro 4. Eficiencia de desinfección a lo largo del estudio.

Número de campaña		Número de muestra						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Entrada (UFC)	20	119	385	63	61	31	167
	Salida (UFC)	24	8	126	100	38	61	4
	Eficiencia de desinfección (%)	0	93	67	0	38	0	98
2	Entrada (UFC)	20	222	44	76	29	100	34
	Salida (UFC)	0	0	0	0	0	0	16
	Eficiencia de desinfección (%)	100 [¶]	100 [¶]	100 [¶]	100 [¶]	100 [¶]	100 [¶]	53
3	Entrada (UFC)	50	104	75	20	88	22	63
	Salida (UFC)	105	1	0	0	1	20	0
	Eficiencia de desinfección (%)	0	99	100 [¶]	100 [¶]	99	9	100 [¶]
4	Entrada (UFC)	203	27	11	415	108		
	Salida (UFC)	1	1	22	0	49		
	Eficiencia de desinfección (%)	99	96	0	100 [¶]	55		

¶ Eventos con la mayor eficiencia de desinfección.

Influencia de las condiciones de operación en la remoción de coliformes.

En la Figura 7 se puede apreciar los eventos en donde, las condiciones en las que operó el sistema fueron óptimas para la desinfección total de las bacterias. Se observa como con un TRH de tres días y una irradiación promedio de 227.5 W/m^2 se desinfecta el mayor número de muestras. En el segundo caso la irradiación disminuye hasta 223.5 W/m^2 , sin embargo, el tratamiento de TRH de 2 días permitió la desinfección de tres de las siete muestras, esto puede deberse a que la carga de coliformes se mantuvo en el rango de $10^1 \text{ UFC} / 100 \text{ mL}$. Finalmente, el tratamiento con TRH de 1 día presentó la irradiación promedio más alta del experimento y le permitió desinfectar únicamente una de las muestras.

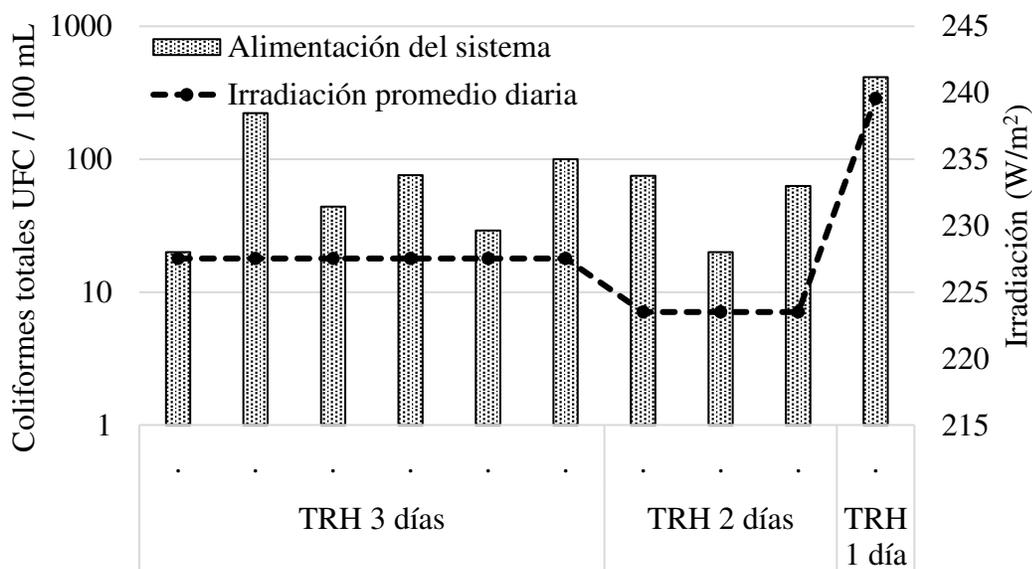


Figura 7. Relación entre condiciones para la desinfección en las repeticiones con inactivación exitosa de coliformes totales.

Principalmente se demuestra una relación entre la irradiación y el TRH con los índices de desinfección. Estos datos concuerdan con el estudio de Martín-Domínguez et al. (2005), en donde los tratamientos que presentaron mayor eficiencia en la remoción de bacterias coliformes, fueron aquellos con los mayor irradiación y tiempo de residencia en el sistema. Resultados similares fueron presentados por Caslake et al. (2004) en su estudio, además concluye que existe una relación entre estos dos factores en términos de eficiencia de desinfección.

El proceso de desinfección solar es efectivo cuando la radiación UV y la temperatura, actúan en conjunto en un periodo de exposición adecuado para la inactivación o destrucción de microorganismos patógenos (Saitoh y El-Ghetany, 2002). Para el experimento la temperatura máxima ocurrió durante la segunda campaña (TRH 3 días) (32 ± 2 °C), a esta temperatura no se presenta ningún efecto bactericida directo. En otras palabras, el evento de desinfección dentro del sistema se le atribuye principalmente al espectro de luz UV contenido en la irradiación y el TRH (Figura 8). Además, esta temperatura refleja como el sistema no hace buen aprovechamiento de la radiación solar y esto se traduce en TRH más largos en comparación con otros estudios. (McGuigan et al., 1998; Meyer y Reed, 2004).

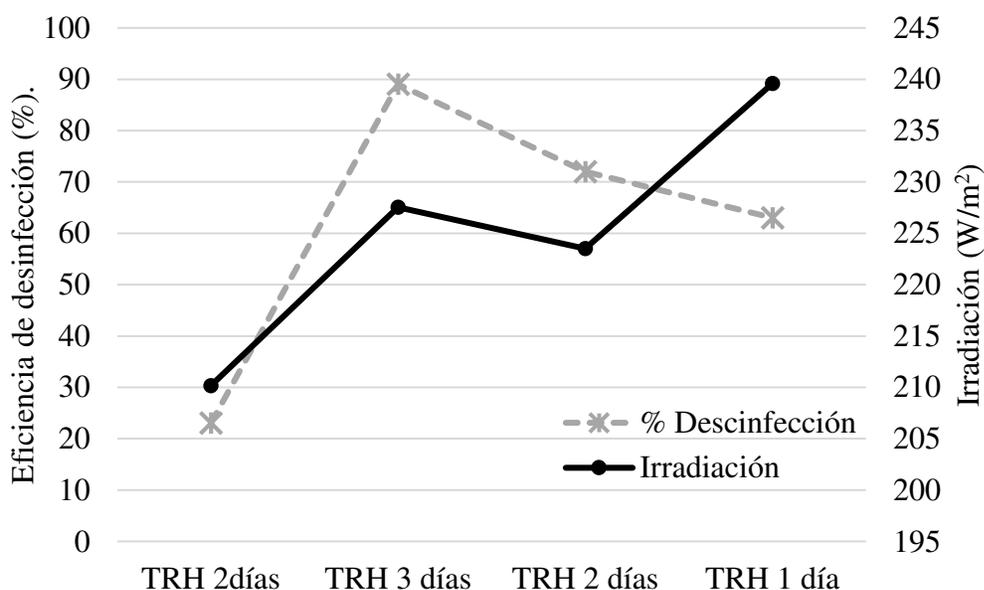


Figura 8. Influencia de la irradiación promedio diaria en porcentaje de desinfección del agua tratada a lo largo de estudio.

4. CONCLUSIONES

- El diseño de sistema de desinfección solar operado bajo condiciones óptimas, es capaz de reducir una carga de coliformes totales de 10^2 UFC/100 mL presente en el agua, cumpliendo con los valores de la norma de agua potable para este parámetro. Con una radiación solar menor a 240 W/m^2 el agua debe circular por el sistema al menos tres días para ser desinfectada.
- El período óptimo de residencia del agua en el sistema operando, es tres veces mayor al que fue establecido para el diseño original, Se concluye que el prototipo no tiene la capacidad de suplir los requerimientos mínimos de volumen de agua potable por familia al día.
- Para un sistema solar automático de flujo continuo, el diagnóstico indica que el diseño aprovecha de forma limitada la radiación solar disponible, al carecer de de una estructura para concentrar la Irradiancia incidente

5. RECOMENDACIONES

- El diseño del sistema de desinfección debe contar con una estructura de concentración solar. Esta modificación capturaría con mayor eficiencia los rayos solares, facilitando el incremento de temperatura y rayos UV en menor tiempo. Esta modificación se traduce en mayores índices de desinfección.
- Mejorar la estructura del sistema, para reducir la probabilidad de fugas que comprometa el flujo de agua durante la operación; así mismo, el diseño debe considerar integrar protección adicional para evitar daños en el circuito, debido a su exposición a la intemperie y posibles fugas del sistema.
- Considerar en el diseño metodologías o modificaciones para dar mantenimiento al sistema, ya que naturaleza del sistema de desinfección, dificulta las labores de mantenimiento del mismo. Esto influye en la eficiencia en el proceso desinfección.
- Repetir el estudio con las mejoras mencionadas y un mayor control en la carga de coliformes del agua a tratar. Verificando el desempeño en la remoción de mayores cargas de coliformes totales, otros patógenos y menor tiempo de retención hidráulica
- Investigar sobre las implicaciones sociales, económicas y ambientales tendría el sistema de desinfección dentro de un mercado o de algún proyecto social.

6. LITERATURA CITADA

- Ahmed, M. (2016). Passive Solar Driven Water Treatment of Contaminated Water Resources (Master's thesis, University of Stavanger), Noruega.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, y Water Environment Federation. (1915). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (Vol. 2). American Public Health Association.
- Arriagada, I. (2002). Cambios y desigualdad en las familias latinoamericanas. *Revista de la CEPAL*. (77), pp. 143-161.
- Burch, J. D., y Thomas, K. E. (1998). Water disinfection for developing countries and potential for solar thermal pasteurization. *Solar Energy*, 64(1), pp. 87-97.
- Carielo da Silva, G. C., Tiba, C., y Calazans, G. M. T. (2016). Solar pasteurizer for the microbiological decontamination of water. *Renewable Energy*, 87, pp. 711-719.
- Caslake, L. F., Connolly, D. J., Menon, V., Duncanson, C. M., Rojas, R., y Tavakoli, J. (2004). Disinfection of contaminated water by using solar irradiation. *Applied and environmental microbiology*, 70(2), pp. 1145-1151.
- Čejková, J., Štípek, S., Crkovska, J., Ardan, T., Platenik, J., Čejka, C., y Midelfart, A. (2004). UV rays, the prooxidant/antioxidant imbalance in the cornea and oxidative eye damage. *Physiol Res*, 53, pp. 1-10.
- Chenoweth, J. (2008). Minimum water requirement for social and economic development. *Desalination*, 229(1-3), pp. 245-256.
- Dejung, S., Fuentes, I., Almanza, G., Jarro, R., Navarro, L., Arias, G., ... y Birrer, C. (2007). Effect of solar water disinfection (SODIS) on model microorganisms under improved and field SODIS conditions. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 56(4), pp. 245-256.

- Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). (2016). Desnutrición crónica y mortalidad infantil. Recuperado de: http://www.unicef.org/honduras/14241_16977.htm
- Gleick, P. H. (1996). Basic water requirements for human activities: meeting basic needs. *Water international*, 21(2), pp. 83-92.
- Grandjean, A. (2004). Water Requirements, Impinging Factors, and Recommended Intakes. World Health Organization. Recuperado de: http://www.who.int/entity/water_sanitation_health/dwq/nutwaterrequir.pdf?ua=1
- HACH. (2017). Coliforms-Total and E. coli, Membrane Filtration Method 10029, m-ColiBlue24®. Recuperado de: <https://www.hach.com/asset-get.download.jsa?id=7639984036>
- Konersmann, L., y Frank, E. (2011). Solar water disinfection: field test results and implementation concepts (Master's thesis, Institut für Solartechnik SPF, University of Applied Science Rapperswil), Suiza.
- Malato, S., Fernández-Ibáñez, P., Maldonado, M. I., Blanco, J., y Gernjak, W. (2009). Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends. *Catalysis Today*, 147(1), pp. 1-59.
- Martín-Domínguez, A., Alarcón-Herrera, M. T., Martín-Domínguez, I. R., y González-Herrera, A. (2005). Efficiency in the disinfection of water for human consumption in rural communities using solar radiation. *Solar Energy*, 78(1), 31-40.
- 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. *Journal of applied microbiology*, 84(6), pp. 1138-1148.
- Meierhofer, R., y Wegelin, M. (2003). Desinfección solar del agua. *Guía de aplicación. Lima, Perú: AGUASAN/COSUDE*. Recuperado de: http://www.sodis.ch/methode/antwortung/ausbildungsmaterial/dokumente_material/manual_s.pdf.
- Meyer, V., y Reed, R. H. (2001). SOLAIR disinfection of coliform bacteria in hand-drawn drinking water. *Water SA*, 27(1), pp. 49-52.
- Montes, G. A. A., Henne, K., Posas, J., Thurston, A., Acosta, M. E., y Withson, D. (2001). Conocimientos y prácticas sobre nutrición infantil, enfermedades diarreicas y respiratorias en Lempira, Honduras. *Rev méd hondur*, 69(2), pp. 52-61.

- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2017). Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data. Recuperado de <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets%40nrcan.gc.ca&step=1&lat=14.0667&lon=-86.3667&submit=Submit>
- Organización Mundial de la Salud. (2004). OMS | Relación del agua, el saneamiento y la higiene con la salud. Recuperado de: http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/facts2004/es/
- Organización Mundial de la Salud. (2017). OMS | Agua potable salubre y saneamiento básico en pro de la salud: (ASS). Recuperado de: http://www.who.int/water_sanitation_health/mdg1/es/
- Pontius, F. W., y American Water Works Association. (1990). Water quality and treatment: A handbook of community water supplies. In *Water quality and treatment: a handbook of community water supplies*. AWWA.
- Quijada, R. (2015). Caracterización bacteriológica del agua embotellada comercializada en la zona centro-oriental de Honduras (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.
- Saitoh, T. S., y El-Ghetany, H. H. (2002). A pilot solar water disinfecting system: performance analysis and testing. *Solar energy*, 72(3), pp.261-269.
- Sinha, R. P., y Häder, D. P. (2002). UV-induced DNA damage and repair: a review. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 1(4), pp. 225-236.
- Wegelin, M., Canonica, S., Mechsner, K., Fleischmann, T., Pesaro, F., y Metzler, A. (1994). Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. *Aqua*, 43(4), pp. 154-169.

7. ANEXOS

Anexo 1. Empaques, tubería flexible de PVC y tubería de policarbonato.



Anexo 2. Módulo de desinfección ensamblado.



Anexo 3. Válvula de entrada de agua y de muestreo.



Anexo 4. Materiales para metodología de filtración por membrana.

