

Artículo Científico / Scientific Article

Análisis de combinaciones de techo y botella para desinfección mediante la metodología SODIS

Analysis of roof and bottle combinations for disinfection using the SODIS methodology

Elfego Homero Cifuentes Taracena¹ 

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos,
Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: cifuenteshomero@gmail.com

Recibido: 30/08/2021

Aceptado: 02/06/2022

Resumen

Los métodos alternativos de desinfección en países latinoamericanos han ido posicionándose como una variante para el suministro de agua para consumo humano para comunidades de recursos limitados, sin embargo, su aplicación se ve afectada por el acceso a los materiales e insumos necesarios para tal propósito. En el caso de la metodología SODIS de desinfección, los materiales que realizan una desinfección eficaz, en muchas ocasiones tienen costos elevados por lo que el presente artículo busca realizar el análisis de materiales de fácil acceso para comunidades de recursos limitados buscando una combinación de techo y botella que permita garantizar una desinfección eficaz a bajo costo y suministrar agua apta para consumo humano para dichas comunidades. En esta investigación se captó agua de lluvia, la cual fue sometida a proceso de desinfección por medio de radiación solar, utilizando la metodología SODIS. El estudio utilizó botellas de dos materiales, uno el tereftalato de polietileno (PET) y otro fue vidrio. Ambas botellas fueron expuestas a la radiación solar sobre dos materiales de techo distintos, uno de lámina de acero y otro de teja de barro. En este estudio se obtuvo una remoción de coliformes totales en un rango de 25% a 50% y una remoción de coliformes fecales en un rango de 53% a 88%, en ambos casos con una exposición solar de 6 horas. La combinación que alcanzó la mejor eficiencia de remoción de coliformes totales y fecales es la combinación de techo de lámina y botellas de PET.

Palabras claves: agua de lluvia, organismos patógenos, coliformes fecales, radiación solar, agua apta para consumo, inactivación microbiológica.

Abstract

In Latin American countries, alternative methods of water disinfection have been positioned as a variant for the supply of drinking water to communities of limited resources. However, their application is affected by a lack of access to the necessary materials and equipment. In the case of the solar disinfection of water (SODIS) method, some materials used have a high cost. In this paper performed the analysis of a combination of roofing materials and bottles subjected to solar radiation and its function as easily accessible disinfectants materials for communities of limited resources to ensure effective disinfection at low cost and provide suitable drinking water for those communities. For this research, rainwater was collected, then it was subjected to a disinfection process by means of solar radiation, using the SODIS methodology. The study used bottles of two materials, the first was polyethylene terephthalate (PET) and other glass. Both bottles were exposed to solar radiation on two different roofing materials, one steel sheet and the other clay tile. In this study a removal efficiency of total coliforms was in the range from 25% to 50%, and a removal efficiency of fecal coliforms was in the range from 53% to 88%; in both cases with an exposure to sunlight of 6 hours. The combination that achieved the best removal efficiency of total and fecal coliforms is the combination of a steel sheet and PET bottles.

Key words: rainwater, pathogenic organisms, fecal coliforms, solar radiation, drinking water, microbiological inactivation.



Introducción

En algunas comunidades de recursos limitados ubicadas en áreas lejanas a los cascos urbanos de Guatemala se presentan serias dificultades para acceder a servicios básicos, principalmente al agua potable, aspecto que ha ido en incremento por la mala calidad de las fuentes superficiales de agua y la escasez del agua de subterránea. Estas condiciones ponen en alto riesgo la salud de estas comunidades a las que se les debe proveer de alternativas para que puedan suministrarse de dotaciones mínimas de agua para su consumo de forma segura.

Derivado de la situación actual, cada vez son más los habitantes de zonas rurales que buscan fuentes de agua alternativas para abastecerse y cumplir sus necesidades diarias del vital líquido, sin embargo, los altos índices de contaminación hídrica que impera en países como Guatemala, provocan que paralelo al aumento del uso de fuentes alternativas de abastecimiento de agua aumente la morbilidad y mortalidad de personas derivado de enfermedades transmitidas por el agua que consumen.

Para combatir dicha situación, diversas instituciones han implementado programas de masificación de tratamientos que puedan utilizarse a nivel domiciliario para obtener agua potable. Dentro de estas opciones se han desarrollado procesos como hervir el agua, la cloración casera, el método de Purificación de Agua (PUR) el cual consiste en una mezcla en polvo de desinfectante (hipoclorito de calcio) que elimina las bacterias y un coagulante (sulfato férrico) que remueve la materia en suspensión, protozoarios y virus y la desinfección solar (SODIS) por sus siglas en inglés consistente en utilizar la radiación solar (rayos UV) aprovechando el incremento de temperatura del agua generado por el sol, para inactivar y destruir los microorganismos patógenos presentes en el agua.

Uno de los métodos que mejor se ha posicionado por su bajo costo de implementación y sus buenos resultados es la metodología SODIS de desinfección, la que se basa en la desinfección solar, utilizando materiales accesibles para las personas, lo que permite al usuario ingerir agua segura luego de un determinado tiempo de exposición solar, siendo este último tema de la exposición solar la única desventaja del método ya que dicho tiempo de exposición puede extenderse a

grandes intervalos de tiempo según el clima de la zona donde se implemente.

El presente estudio tiene como principal objetivo el determinar la combinación de materiales de techo y botellas que presente mayor eficiencia para la desinfección de agua de lluvia y haga esta última apta para consumo humano mediante la metodología SODIS.

Para cumplir dicho objetivo el presente estudio analizó 4 distintas combinaciones de techo (lamina de acero y teja de barro) y botella (PET o vidrio), para 4 muestreos realizados en distintas fechas, analizando una totalidad de 72 muestras de agua de lluvia, en donde se realizó la caracterización inicial de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la fuente de agua para tener un punto de partida de referencia.

Durante el estudio se pudo determinar la eficiencia de remoción de microorganismos presentes luego de los tiempos de exposición analizados y de este modo comparar la eficiencia de remoción de microorganismos presentes en el agua de cada una de las combinaciones de techo (lamina de acero y teja de barro) y botella (PET o vidrio).

Antecedentes

En Guatemala, en específico en las zonas rurales, existe un déficit de acceso a agua potable por parte de la población, esto debido a factores tales como la distancia a la que se encuentran las fuentes de agua, el factor socioeconómico del área y por último la escasez de agua en algunas zonas. Dichos factores provocan que las personas tengan que utilizar fuentes de agua alternativas y en ocasiones ingerir agua sin ningún proceso de desinfección para poder satisfacer su demanda de agua.

Entre los métodos alternativos de desinfección se encuentra la metodología SODIS, misma que en los últimos años ha tomado auge en la región centroamericana, mostrando adecuadas eficiencias, tal es el caso del estudio realizado por Ortiz (2008), quien evaluó el impacto del consumo de agua desinfectada mediante la metodología SODIS y su incidencia en enfermedades diarreicas en niños menores de 5 años en comunidades del departamento de San Marcos de Guatemala.

Este autor determino que la metodología SODIS de desinfección brinda resultados aceptables de desinfección para agua apta para consumo humano, sin embargo, los resultados de su análisis señalan que dicha metodología no es de las más utilizadas en la zona debido a la complejidad de su aplicación por lo que la población de la zona se inclina más por una desinfección con cloro para el agua que utilizan para sus actividades domésticas.

Otro caso de análisis es el publicado por López (2011) quien evaluó la eficiencia del método de desinfección solar SODIS en fuentes de aguas naturales tales como pozos artesanales o nacimientos naturales que presentaron contaminación fecal y que son utilizadas para el consumo humano en comunidades de San Juan Sacatepéquez del departamento de Guatemala, evaluando para tal propósito un total de nueve puntos repartidos en ocho pozos artesanales y un nacimiento natural de agua.

Entre sus resultados López (2011) destaca que del análisis inicial de las muestras en cuestión, el 100% de ellas presentaba una contaminación por coliformes totales y fecales, adicional a ello, también determino que cumplían con los requerimientos para ser desinfectados mediante la metodología SODIS, luego de aplicar este método alternativo de desinfección, los resultados obtenidos por López (2011) resaltan que un 65% de las muestras analizadas presentaron una reducción del 100% de coliformes totales, además, un 75% de las mismas muestras obtuvieron una reducción del 100% de coliformes fecales.

Los estudios descritos anteriormente muestran como la metodología SODIS es una alternativa fiable para la desinfección de agua, corroborando sus ventajas y confiabilidad en fuentes de agua naturales, como lo son los pozos artesanales y nacimientos de agua, agregado a ello uno de los dos estudios muestra como a pesar de la efectividad del tratamiento, la población debido a la complejidad y tiempos de espera, se inclinan por métodos de desinfección más tradicionales como lo es la aplicación de cloro al agua.

Sin embargo, en algunas zonas de Guatemala, no existen fuentes de agua como las descritas en el párrafo anterior, por lo que las poblaciones buscan otro tipo de fuentes como el agua de lluvia. Para el presente estudio se propuso el agua de lluvia como una fuente

secundaria de abastecimiento de agua, en donde tal y como resalta Aguilar (2017) el agua de lluvia puede llegar a cumplir con la mayoría de lo establecido por la norma COGUANOR 29001, exceptuando los parámetros bacteriológicos y el color, en donde para poder considerar el agua como apta para consumo humano debe ser sometida a un proceso de tratamiento para evitar problemas o daños en la salud de los consumidores.

Otro ejemplo a nivel internacional de dicho análisis son los resultados obtenidos por Nalwanga et al. (2018) quienes realizaron un análisis de lo mencionado anteriormente, sus conclusiones señalan que el agua de lluvia recolectada en el techo utilizada para beber en comunidades rurales de la zona de África subsahariana no cumple con las normas microbiológicas nacionales e internacionales para el agua potable. Agregado a ello, los autores determinaron que la metodología SODIS ha demostrado mejorar significativamente la calidad del agua en la mayoría de las muestras de agua de lluvia recolectadas y estudiadas.

Cada uno de los autores anteriormente mencionados realizaron sus respectivos estudios planteando la metodología SODIS como método de desinfección sin embargo coincidieron en que una de las mayores desventajas de la metodología SODIS, es el tiempo de exposición al sol, ya que el mismo depende de muchos factores como lo son la turbiedad y el color del agua, el estado de las botellas utilizadas y por último el material del que se componen las botellas utilizadas además de la superficie en la que se exponen al sol.

Un estudio interesante es el realizado por Vivar et al. (2015), quienes analizaron la posible influencia de los materiales basándose en los materiales utilizados en tejados en la zona templada de Alcalá de Henares, España, siendo estos la lámina de acero o zinc y el bambú, los autores antes mencionados, señalan que las botellas colocadas sobre las láminas metálicas de acero o zinc alcanzaron un nivel de inactivación mayor a las colocadas en la cubierta de bambú, tanto para E. Coli y coliformes totales.

Como parte del análisis de las botellas elegidas para ser utilizadas en la metodología SODIS, en el año 2014, los autores Lawrie et al. (2015) analizaron el efecto de los diversos materiales utilizados en las botellas para la metodología SODIS en su análisis evaluaron 3 diversos materiales, la bolsa de polietileno (PE), la

bolsa de polietileno (PE) y acetato de etilen vinilo (EVA), además de las botellas de tereftalato de polietileno (PET), en donde llegaron a la conclusión que las botellas PET a pesar de no haber obtenido los mejores resultados realizaron una desinfección eficaz en comparación con los otros materiales, además, en cuestión de su costo es una alternativa fiable para su implementación en dicha metodología.

Como complemento de lo descrito anteriormente, los autores García-Gil et al. (2020) realizaron la comparación de algunos plásticos utilizados en la fabricación de las botellas utilizadas para la metodología SODIS, entre los plásticos comparados destacan: los plásticos poco foto-estables como el poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), polipropileno (PP) y polietileno (PE)). También se pueden encontrar los plásticos moderadamente foto-estables como el tereftalato de polietileno (PET) y policarbonato (PC). Y por último se analizaron los plásticos altamente foto-estables como el polimetilmetacrilato (PMMA).

Estos autores evaluaron parámetros como resistencia, foto-estabilidad, durabilidad y los costos de producción de cada uno de los materiales analizados, concluyendo que, en cuanto a resistencia fue el Poliestireno (PS) quien tiene la resistencia más baja, en cuanto a su durabilidad fue el polimetilmetacrilato (PMMA) quien tuvo los mejores resultados, seguidos de el tereftalato de polietileno (PET) y policarbonato (PC), por último en cuanto a costos se puede decir que estos últimos tienen un costo moderado en comparación con los demás.

García-Gil et al. (2020) señalan además que, el PP, el PC, el PMMA y el PET son materiales candidatos adecuados para los dispositivos solares de desinfección de agua: el PP tiene poca durabilidad, pero se puede reemplazar económicamente, el PET y el PC tienen una durabilidad y costos de producción moderados, y el PMMA es un plástico costoso, pero relativamente no afectado por la intemperie.

En cuanto al tiempo de exposición solar Matus (2020) menciona que, para alcanzar una desinfección solar se debe de exponer el agua un tiempo mínimo de 6 horas, agregado a que en ese lapso se debe alcanzar una temperatura cercana a los 50°C.

Peñafiel y Manuel. (2015) en la evaluación realizada a la metodología SODIS, señala que tras la aplicación de

la metodología SODIS a las muestras de agua utilizadas en su experimento durante las 6 horas de exposición en condiciones de sol en un horario de 9:00 de la mañana a 3:00 de la tarde y durante 2 días para condiciones climáticas nubosas con radiación solar promedio de 852 W/m² se obtuvo un 100% de eliminación de coliformes fecales.

Salazar et al. (2019) utilizando una variante donde se agrega jugo de limón a las muestras previo a exponerlas al sol, señala que el método no obtuvo una efectividad del 100% para las muestras analizadas, sin embargo la remoción alcanzada en cada una de sus muestras es aceptable como agua para consumo humano, derivado de que luego de la exposición solar de la mezcla de agua con jugo de limón no se eliminó en un 100% los coliformes totales presentes todas las muestras analizadas, pero si se llegó a niveles aceptables para la salud del consumidor de acuerdo a los límites admisibles de la ONU.

Adicional el estudio mencionado en el párrafo anterior, demostró obtener mejores resultados que la aplicación de la metodología SODIS tradicional, y menciona que el aplicar jugo de limón a el agua a desinfectar, ha demostrado tener resultados más eficientes que una aplicación de la metodología SODIS tradicional.

Metodología

Para el desarrollo experimental del estudio se captó agua de lluvia del techo de una vivienda, la cual fue sometida a proceso de desinfección por medio de radiación solar, utilizando la metodología SODIS.

El estudio utilizó botellas de dos materiales, uno de ellos fue de tereftalato de polietileno (PET) y otro de vidrio. Ambas botellas fueron expuestas a la radiación solar sobre dos materiales de techo distintos, uno de lámina de acero comercial y otro en teja de barro.

El agua de lluvia utilizada para el presente estudio fue captada mediante métodos artesanales en una de las viviendas ubicadas en las instalaciones de la planta piloto de Tratamiento de Aguas Residuales Aurora II Ingeniero Arturo Pazos, de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

La planta piloto de tratamiento de Aguas Residuales de la ERIS se encuentra ubicada dentro de la colonia

Aurora 2, Diagonal 26, 20-56 zona 13 de la ciudad de Guatemala, con coordenadas geográficas:

- Longitud: 90°32'12.10"O
- Latitud: 14°34'41.31"N

Para la recolección del agua de lluvia se implementó un sistema de canalización de estas para su recolección en toneles sellados sanitariamente.

Para la exposición al sol de las muestras se construyó una estructura compuesta por los materiales de techo de lámina de acero y teja de barro a aplicar en el experimento, dicha estructura se ubicó en una zona descampada de la Planta Piloto, con el fin de obtener la máxima cantidad de horas de exposición solar directa para las botellas del experimento.

Como primer paso, se tomó una muestra de 1 litro para realizar la caracterización inicial del agua captada, midiendo parámetros tales como: color, turbiedad, pH, conductividad, sólidos disueltos, coliformes totales y fecales.

Posterior, se llenaron 8 botellas de 1 litro de material PET, y 8 botellas de vidrio, para exponer al sol en cada uno de los materiales de techo que se analizaron (lámina de acero y teja de barro), las mismas se colocaron todas al mismo tiempo, para posteriormente retirar una botella de cada combinación de materiales a las 2, 4, 6 y 8 horas de exposición solar respectivamente. La exposición solar se llevó a cabo entre las 08:00 y las 16:00 horas, en distintos días.

Para cada una de las botellas se midieron los mismos parámetros que para la muestra inicial (color, turbiedad, pH, conductividad, sólidos totales, coliformes totales y fecales) con lo cual se realizó una curva de comparación del comportamiento de cada uno de los parámetros conforme mayor fue el tiempo de exposición.

El método para medir los parámetros de coliformes totales y fecales fue el de Colilert, la turbiedad fue medida por medio del TURBIDIMETRO HACH 2100AN y el color se midió utilizando un Espectrofotómetro Spectroquant NOVA60A. Para el resto de las variables a analizar se utilizó el potenciómetro mismo que entre sus funciones mide todas las variables en cuestión.

Con base en estos resultados se determinó la remoción de coliformes totales y fecales realizada por el método SODIS de desinfección para cada una de las muestras de techo y botella expuestas anteriormente.

Resultados

En la tabla No. 1, se observa la concentración de coliformes totales obtenido luego de la exposición solar realizada al agua de lluvia en los distintos materiales de techo evaluado para un total de cuatro repeticiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos para los parámetros fisicoquímicos analizados, el agua de lluvia utilizada para la investigación presentó un rango de color de 16.00 a 330.00 U Pt-CO, el rango de turbiedad oscilo entre 1.23 a 8.98 NTU.

En cuanto a conductividad y sólidos disueltos las concentraciones encontradas fueron bajas con rangos entre 20 a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 10.40 a 52.00 mg/L, respectivamente. Por último, en términos del potencial de hidrogeno se determinó que es un agua acida con un rango de 3.90 a 6.30, lo que implica que no es apta para consumo humano.

Para los resultados obtenidos, por el rango de detección del método Colilert para coliformes, se tiene que para algunas muestras la concentración puede llegar a ser mayor a los 2,419.60 NMP/100 cm³ cuando la escala de detección no es suficiente para determinar la concentración real de la muestra en cuestión.

Para esos casos, en el presente estudio se supuso una remoción del 0.00% cuando no se presentaba variación en un rango dentro de la escala de detección del método Colilert.

Dicho criterio aplico para coliformes fecales y totales, teniendo adicional una concentración menor a 1.00 NMP/100 cm³ cuando está se encontraba por debajo de la escala de detección.

Tabla 1. Concentraciones de Coliformes Totales obtenidas luego de la exposición solar para cada una de las combinaciones analizadas.

COLIFORMES TOTALES (NMP/100 cm3)					
COMBINACIÓN	HORAS	MUESTREO 1	MUESTREO 2	MUESTREO 3	MUESTREO 4
TECHO: LÁMINA BOTELLA: PET	0	>2,419.60	1,553.20	> 2,419.60	> 2,419.60
	2	>2,419.60	1,299.70	> 2,419.60	> 2,419.60
	4	151.50	2,419.60	> 2,419.60	> 2,419.60
	6	18.70	6.10	> 2,419.60	> 2,419.60
	8	10.10	1.00	> 2,419.60	> 2,419.60
TECHO: LÁMINA BOTELLA: VIDRIO	0	>2,419.60	1,299.70	> 2,419.60	> 2,419.60
	2	2,419.60	1,046.20	> 2,419.60	> 2,419.60
	4	122.30	1,203.30	> 2,419.60	> 2,419.60
	6	31.30	9.20	> 2,419.60	> 2,419.60
	8	7.10	4.00	> 2,419.60	> 2,419.60
TECHO: TEJA BOTELLA: PET	0	>2,419.60	1,553.20	> 2,419.60	> 2,419.60
	2	>2,419.60	2,419.60	> 2,419.60	> 2,419.60
	4	2,419.60	1,732.90	> 2,419.60	> 2,419.60
	6	46.50	> 2,419.60	> 2,419.60	> 2,419.60
	8	249.50	11.40	> 2,419.60	> 2,419.60
TECHO: TEJA BOTELLA: VIDRIO	0	>2,419.60	1,299.70	> 2,419.60	> 2,419.60
	2	>2,419.60	1,203.30	> 2,419.60	> 2,419.60
	4	248.10	1,986.30	> 2,419.60	> 2,419.60
	6	461.10	42.80	> 2,419.60	> 2,419.60
	8	160.70	8.00	> 2,419.60	> 2,419.60

Como análisis de los resultados enumerados en la tabla No. 1, en la tabla No. 2 se muestra el porcentaje de remoción de coliformes totales, obtenido este como la diferencia entre la concentración de coliformes totales luego de la exposición solar menos los coliformes totales previo a la exposición.

En la tabla No. 3, se observa la concentración de coliformes fecales obtenido luego de la exposición solar a distintos intervalos de tiempo realizada al agua de lluvia en los distintos materiales de techo evaluado un total de cuatro repeticiones.

En la tabla No. 4 se observa el análisis de los resultados obtenidos en la tabla No. 3, reflejados como el porcentaje de remoción de coliformes totales, obtenido este como la diferencia entre la concentración de coliformes fecales luego de la exposición solar menos los coliformes fecales previo a la exposición.

Para el análisis de las combinaciones de techo y botella utilizadas para la desinfección de agua de

lluvia mediante la metodología SODIS se utilizaron los promedios de remoción tanto de coliformes totales como fecales, para tal propósito se utilizó una nueva simbología en cuanto a las combinaciones utilizadas para simplificar el proceso y ayudar a la comprensión de estas, La simbología aplicada para este análisis se presenta en la tabla No. 5.

En la tabla No. 6, se presenta el resultado obtenido para el promedio de los porcentajes de remoción para cada una de las combinaciones utilizadas para los intervalos de exposición ya descritos.

En la tabla No. 7, se muestran los resultados obtenidos en cuanto a la remoción alcanzada para los coliformes fecales en las distintas combinaciones realizadas.

Tabla 2. Porcentajes de remoción de coliformes totales para cada una de las combinaciones de techo y botella, analizados luego de la exposición solar para distintos intervalos de tiempo.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLIFORMES TOTALES					
COMBINACIÓN	HORAS	MUESTREO 1	MUESTREO 2	MUESTREO 3	MUESTREO 4
TECHO: LÁMINA BOTELLA: PET	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	2	0.00%	16.32%	0.00%	0.00%
	4	93.74%	0.00%	0.00%	0.00%
	6	99.23%	99.61%	0.00%	0.00%
	8	99.58%	99.94%	0.00%	0.00%
TECHO: LÁMINA BOTELLA: VIDRIO	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	2	0.00%	19.50%	0.00%	0.00%
	4	94.95%	7.42%	0.00%	0.00%
	6	98.71%	99.29%	0.00%	0.00%
	8	99.71%	99.69%	0.00%	0.00%
TECHO: TEJA BOTELLA: PET	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	4	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%
	6	98.08%	0.00%	0.00%	0.00%
	8	89.69%	99.27%	0.00%	0.00%
TECHO: TEJA BOTELLA: VIDRIO	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	2	0.00%	7.42%	0.00%	0.00%
	4	89.75%	0.00%	0.00%	0.00%
	6	80.95%	96.71%	0.00%	0.00%
	8	93.36%	99.38%	0.00%	0.00%

Tabla 3. Concentraciones de Coliformes Fecales obtenidas luego de la exposición solar para cada una de las combinaciones analizadas.

COLIFORMES FECALES (NMP/100 cm3)					
COMBINACIÓN	HORAS	MUESTREO 1	MUESTREO 2	MUESTREO 3	MUESTREO 4
TECHO: LÁMINA BOTELLA: PET	0	7.10	18.80	319.90	73.80
	2	1.00	1.00	727.00	15.30
	4	1.00	1.00	866.40	< 1.00
	6	< 1.00	< 1.00	259.30	< 1.00
	8	< 1.00	< 1.00	158.50	< 1.00
TECHO: LÁMINA BOTELLA: VIDRIO	0	25.90	5.00	343.30	95.90
	2	6.00	3.00	727.00	14.20
	4	< 1.00	1.00	648.80	5.10
	6	< 1.00	< 1.00	328.20	2.00
	8	< 1.00	< 1.00	238.20	< 1.00
TECHO: TEJA BOTELLA: PET	0	7.10	18.80	319.90	73.80
	2	3.00	3.10	547.70	14.40
	4	< 1.00	1.00	920.80	1.00
	6	< 1.00	4.10	461.10	4.10
	8	< 1.00	< 1.00	280.90	< 1.00
TECHO: TEJA BOTELLA: VIDRIO	0	25.90	5.00	343.30	95.90
	2	7.10	3.00	686.70	9.40
	4	1.00	4.10	1299.70	3.10
	6	< 1.00	< 1.00	387.30	1.00
	8	< 1.00	< 1.00	157.60	< 1.00

Tabla 4. Porcentajes de remoción de coliformes fecales para cada una de las combinaciones de techo y botella analizados luego de la exposición solar para distintos intervalos de tiempo.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES					
COMBINACIÓN	HORAS	MUESTREO 1	MUESTREO 2	MUESTREO 3	MUESTREO 4
TECHO: LÁMINA BOTELLA: PET	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	2	85.90%	94.70%	0.00%	79.27%
	4	85.90%	94.70%	0.00%	99.91%
	6	99.90%	99.90%	18.94%	99.91%
	8	99.90%	99.90%	50.45%	99.91%
TECHO: LÁMINA BOTELLA: VIDRIO	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	2	76.80%	40.00%	0.00%	85.19%
	4	99.90%	80.00%	0.00%	94.68%
	6	99.90%	99.80%	4.40%	97.91%
	8	99.90%	99.90%	30.61%	99.91%
TECHO: TEJA BOTELLA: PET	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	2	57.70%	83.50%	0.00%	80.49%
	4	99.90%	94.70%	0.00%	98.64%
	6	99.90%	78.20%	0.00%	94.44%
	8	99.90%	99.90%	12.19%	99.89%
TECHO: TEJA BOTELLA: VIDRIO	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	2	72.60%	40.00%	0.00%	90.20%
	4	96.10%	18.00%	0.00%	96.77%
	6	99.90%	99.90%	0.00%	98.96%
	8	99.90%	99.90%	54.09%	99.91%

Tabla 5. Simbología de las combinaciones de materiales utilizadas

COMBINACIÓN	MATERIALES
COMB. 1	TECHO: LÁMINA BOTELLA: PET
COMB. 2	TECHO: LÁMINA BOTELLA: VIDRIO
COMB. 3	TECHO: TEJA BOTELLA: PET
COMB. 4	TECHO: TEJA BOTELLA: VIDRIO

Tabla 6. Promedio de los porcentajes de remoción de coliformes totales para cada combinación e intervalo de tiempo analizado.

HORAS	COMB 1	COMB. 2	COMB. 3	COMB.4
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
2	4.08%	4.88%	0.00%	1.85%
4	23.44%	25.59%	0.01%	22.44%
6	49.71%	49.50%	24.52%	44.41%
8	49.88%	49.85%	47.24%	48.19%

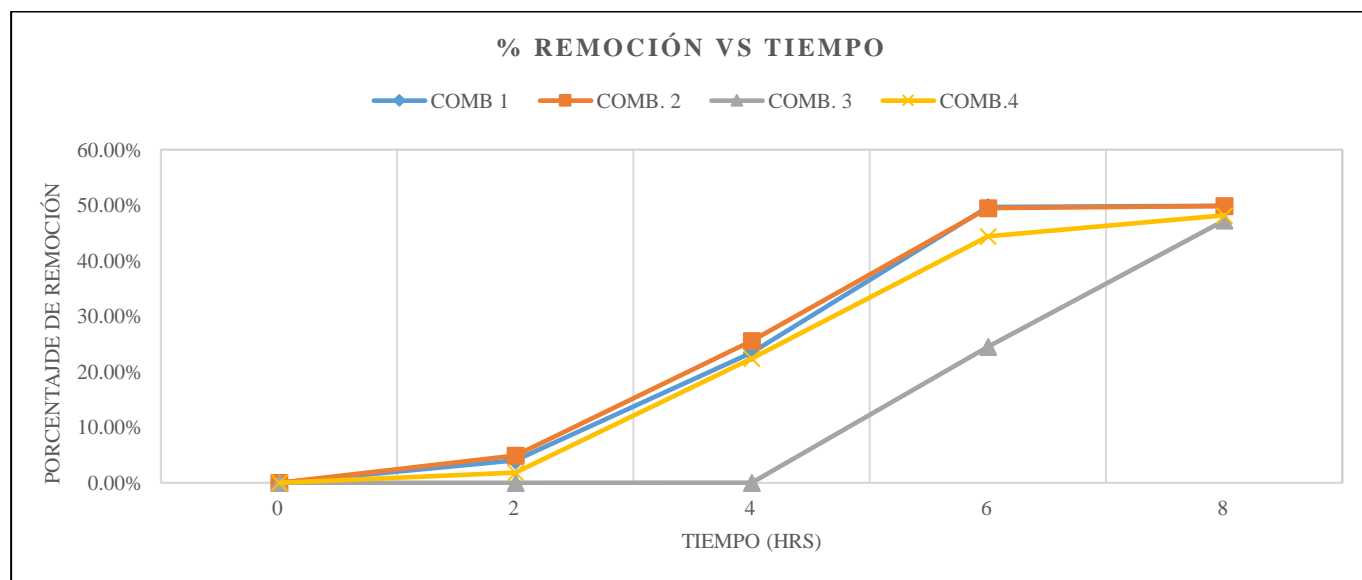
Tabla 7. Promedio de los porcentajes de remoción de coliformes fecales

HORAS	COMB 1	COMB. 2	COMB. 3	COMB.4
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
2	64.97%	50.51%	55.44%	50.70%
4	70.13%	68.65%	73.30%	52.73%
6	79.66%	75.50%	68.12%	74.69%
8	87.54%	82.58%	77.97%	88.45%

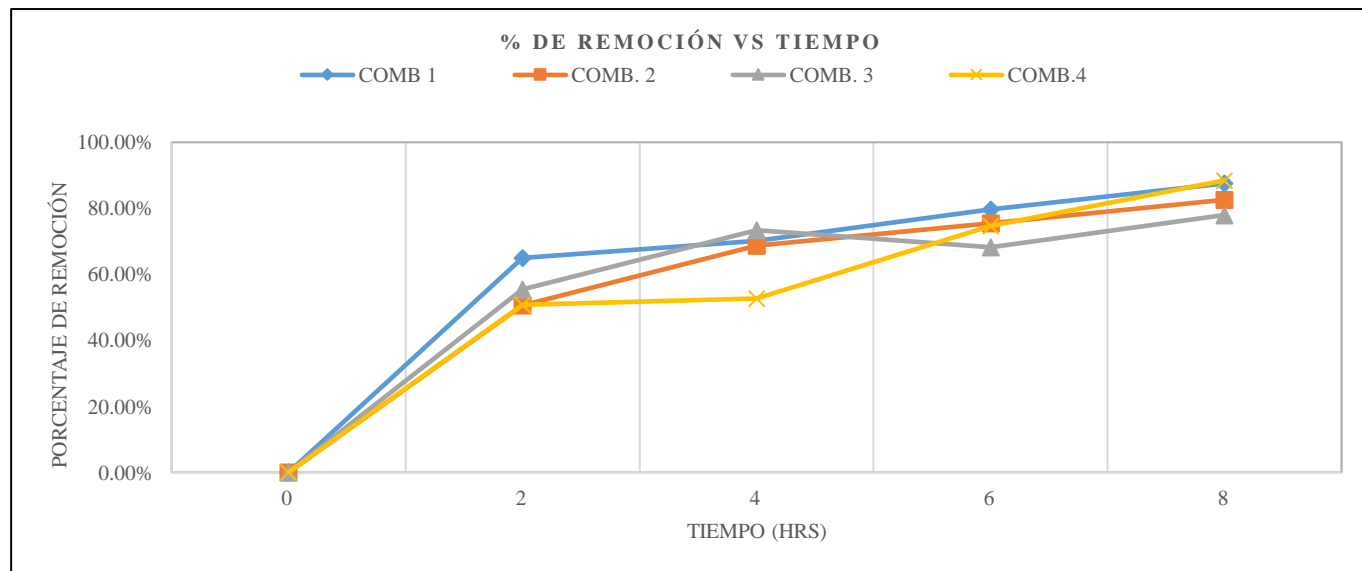
En la gráfica No.1, se muestra el comportamiento de los promedios de los porcentajes de remoción de coliformes totales para cada una de las muestras debido a la cantidad de horas de exposición transcurridas previo a su análisis.

En la gráfica No.2, se muestra el porcentaje de remoción promedio de coliformes fecales vs tiempo de exposición transcurrido por combinación.

Gráfica 1. Porcentaje de remoción promedio de coliformes totales vs tiempo de exposición transcurrido por combinación



Gráfica 2. Porcentaje de remoción promedio de coliformes fecales vs tiempo de exposición transcurrido por combinación



Discusión de resultados

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos analizados, se puede decir que de acuerdo con los límites planteados por la OMS en su Guías para la calidad del agua de consumo humano del año 2011, los parámetros analizados en este estudio cumplen en su mayoría con esta guía, sin embargo, algunos parámetros como el pH hacen que el agua de lluvia estudiada no sea apta para consumo humano.

Para determinar cuál de las combinaciones de materiales es más eficiente para la desinfección de agua de lluvia mediante la metodología SODIS en términos de los coliformes totales se analizaron los promedios de los porcentajes de remoción de la tabla 6, así como el comportamiento de la gráfica 1, observándose que el comportamiento de los promedios obtenidos se manejó según la tendencia esperada, siendo esta que el porcentaje de remoción iba aumentando conforme las horas de exposición iban aumentando.

Para las combinaciones analizadas en el presente estudio, podemos observar que los mejores resultados se dieron transcurridas 6 y 8 horas de exposición y fueron obtenidos por la combinación de techo de lámina de acero y botella PET con eficiencias en el rango de 49.71% a 49.88% para los coliformes totales y entre un 79.66% a 87.64% para coliformes fecales, seguida muy de cerca por la combinación de techo de teja de barro y botella de vidrio con eficiencias en el rango de 44.41% a 49.19% para los coliformes totales y entre un 74.69% a 88.45% para coliformes fecales.

La combinación de techo de lámina de acero y botella de vidrio quedó en tercera posición con rangos entre el 49.50% y 49.89% para coliformes totales y un rango entre 75.50% a 82.58% de eficiencia para coliformes fecales, por último, los resultados de eficiencia menores fueron dados por la combinación de techo de teja de barro y botella PET con un rango de 24.52% a 47.24% para coliformes totales y un rango entre el 68.12% y 77.97% para coliformes fecales.

En relación a los materiales que componen dichas combinaciones se observó que, en relación a los materiales de techo, entre la lámina de acero o zinc y la teja de barro, la lámina de acero o zinc posee propiedades térmicas que sin importar la botella que se utiliza puede llegar a presentar porcentajes de remoción aceptables tal y como afirman los autores Vivar et al.

(2015) en donde señalan que las botellas colocadas sobre las láminas metálicas de acero o zinc alcanzaron un nivel de inactivación mayor a las colocadas en la cubierta de bambú, tanto para *E. coli* y coliformes totales, por lo que podemos concluir también que, para poder tener una remoción eficiente y eficaz, dicho material como techo ayuda en gran medida el cumplimiento de tal objetivo.

Para el techo de teja de barro, al comparar los resultados de las combinaciones que contienen dicho material como techo, podemos decir que se pueden esperar mejores valores de remoción al utilizar botellas de vidrio para la aplicación de la metodología SODIS de desinfección, a comparación de las botellas PET, esto derivado a las propiedades de transmisión de calor de ambos materiales, donde al tener una transmisión de calor baja entre ellos, la temperatura del agua se mantiene por una mayor cantidad de tiempo, facilitando que pueda llegar a elevarse a la temperatura de inactivación o eliminación de los coliformes totales y fecales.

Lo mencionado anteriormente también afirma los resultados y afirmaciones realizadas por los autores García-Gil et al. (2020), quienes indican que el PET son materiales candidatos adecuados para los dispositivos solares de desinfección de agua, así como lo expresado por Lawrie et al. (2015) quienes llegaron a la conclusión que las botellas PET a pesar de no haber obtenido los mejores resultados realizaron una desinfección eficaz en comparación con los otros materiales.

En cuanto al tiempo de exposición solar, tal y como afirma Matus (2020) para alcanzar una desinfección solar, se debe de exponer el agua un tiempo mínimo de 6 horas, asimismo los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con el estudio de Peñafiel y Manuel (2015) quienes señalaron que tras la aplicación de la metodología SODIS a las muestras de agua utilizadas en su experimento durante las 6 horas de exposición mínimas en condiciones de sol se obtuvo un 100% de eliminación de coliformes fecales, los resultados de mayor eficiencia para su experimento se dieron en los intervalos de 6 y 8 horas de exposición solar.

En cuanto a las eficiencias de remoción obtenidas para coliformes totales y fecales, se observó en los resultados que la remoción para coliformes fecales fue mucho mayor que para coliformes totales, una

explicación a este tema puede ser que los tipos de microorganismos existentes en el agua de lluvia del experimento necesitaban altas temperaturas para su inactivación o eliminación y dicha temperatura varían según el microorganismo que se encuentre presente, siendo los microorganismos del tipo de coliformes totales los que mayor temperatura necesitaban para este propósito, temperatura que no se alcanzó a lo largo de la exposición y que pudo llegarse a ver reflejado en los porcentajes de remoción, mientras que la temperatura de inactivación o eliminación de los microorganismos del tipo de coliformes fecales si fue alcanzada durante el experimento y por ende presenta mejores resultados de remoción de estos.

Como integración del análisis de cada uno de los parámetros de esta investigación, se determinó que la combinación de materiales que presenta mayor eficiencia para la desinfección de agua de lluvia y hace está última apta para consumo humano mediante la metodología SODIS en cumplimiento con la Guía para la calidad de Agua para el Consumo Humano emitida por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011), es la combinación de los materiales de techo lámina y botella PET presentando los mejores resultados en promedio a partir de las 6 horas de exposición, sin embargo, los resultados presentados por la combinación de techo de teja de barro y botella de vidrio son muy cercanos y pudieran llegar a ser considerados también como una buena combinación para la aplicación de la metodología de desinfección.

Conclusiones

El uso del agua de lluvia como fuente de abastecimiento de agua para consumo humano en zonas urbanas está condicionado a parámetros fisicoquímicos, más allá de los bacteriológicos, ya que a pesar de aplicar una desinfección eficiente aplicando la metodología SODIS, el agua obtenida no es apta para consumo humano por su potencial de hidrogeno, debido a que puede generar daños severos en la salud del consumidor, tanto digestivos como respiratorios, de lo anterior podemos decir que los rangos de pH en el cual se sitúan los resultados de las muestras indican que está fuera de cualquier parámetro que pudiera considerarse para el consumo humano de dicha fuente de abastecimiento.

En términos de la eficiencia de la metodología SODIS de desinfección los porcentajes de remoción para cada

una de las combinaciones fue mayor al 75% para coliformes fecales y mayor al 50% para coliformes totales, por lo que la eficiencia de las combinaciones se puede considerar como aceptable, los resultados anteriores también pueden indicar que según la temperatura que alcance el agua a tratar mediante la presente metodología se inactivan cierto tipo de microorganismos, y que dependiendo del tipo de microorganismos presentes en la fuente de abastecimiento, se necesitará llegar a cierta temperatura para poder obtener un agua apta para consumo humano. Para el análisis de coliformes totales, en cuanto a la eficiencia de remoción de las combinaciones de materiales luego de transcurridas seis horas de tiempo de exposición y en conjunto con las ocho horas de exposición, se puede decir que la combinación que alcanzó los mejores resultados fue la combinación de techo de lámina y botella PET, seguida por la combinación de techo de lámina con botella de vidrio, dejando en tercera posición a la combinación de techo de teja con botella de vidrio y como la que alcanzo los peores resultados la de techo de teja con botella PET.

En cuanto a los coliformes fecales, luego de transcurridas seis horas de tiempo de exposición, en promedio con las ocho horas de exposición, la combinación que alcanzó los mejores resultados fue la combinación de techo de lámina y botella PET, seguida por la combinación de techo de teja con botella de vidrio, dejando en tercera posición a la combinación de techo de lámina con botella de vidrio y como la que alcanzo los peores resultados la de techo de teja con botella PET.

En conclusión, la combinación de materiales más eficiente para la desinfección de agua de lluvia para consumo humano mediante la metodología SODIS luego de transcurridas seis horas de tiempo de exposición, en promedio con las ocho horas de exposición, y derivado a que fue eficiente tanto para coliformes totales como fecales, es la combinación número 1, conformada por un techo de lámina y la utilización de botellas de PET como componentes de la metodología.

Referencias

Aguilar, R. (2017). Evaluación de la calidad de agua de lluvia captada a través de un módulo sanitario familiar de rápida instalación. Guatemala,

- Guatemala, Revista Agua Saneamiento y Ambiente. Vol. 13. ISSN 2222 2499.
- García-Gil, Á., Pablos, C., García-Muñoz, R., McGuigan, K., & Marugán, J. (2020). Material selection and prediction of solar irradiance in plastic device for application of solar water disinfection (SODIS) to inactivate viruses, bacteria and protozoa. *Science of The Total Environment*, Vol. 730, pp.1-9. [En línea]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139126>.
- López, R. (2011). Aplicación del método de desinfección solar SODIS en fuentes de aguas naturales utilizadas para consumo humano en comunidades de San Juan Sacatepéquez, Guatemala. [Tesis licenciatura, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Guatemala.
- Lawrie, K., Mills, A., Figueredo-Fernandez, M., Guitierrez-Alfaro, S., Manzano, M., & Saladin, M. (2015). UV dosimetry for solar water disinfection (SODIS) carried out in different plastic bottles and bags. *Sensor and Actuators B: Chemical*, Vol. 208, pp.608-615. [En línea]. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.11.031>.
- Matus, I. (2020). Energía solar como fuente de desinfección del agua para consumo humano a nivel domiciliario mediante una tecnología social. Caso Magdalena Teitipac, Oaxaca. [Tesis de maestría del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Regional Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional]. Oaxaca, México.
- Nalwanga, R., Muyanja, C., McGuigan, K., & Quilty, B. (2018). A study of the bacteriological quality of roof-harvested rainwater and evaluation of SODIS as a suitable treatment technology in rural Sub-Saharan Africa. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol.6, pp.3648-3655. [En línea]. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.008>.
- Organización Mundial de la Salud -OMS-. (2011). Guías para la calidad del agua para consumo humano. Ginebra, Suiza, OMS.
- Ortiz, O. (2008). Línea base de calidad de agua del método SODIS en doce comunidades de Tacaná, Tajumulco y Sibinal. [Tesis de maestría, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Guatemala.
- Peñañiel, B. y Manuel D. (2015). Desinfección solar para abastecimiento de agua de consumo humano a nivel domiciliario en el sector de la Pereira, parroquia La Avanzada, cantón Santa Rosa, provincia de el Oro. Machala. *Journal of Environmental Sciences*.
- Salazar, M., Rodas, M., Axpucac, Y., Solís, K. (2019) Efectividad del método de purificación de agua con limón y luz solar, en contraste con el método de agua clorada. [Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Guatemala
- Vivar, M., Fuentes, M., Castro, J., & Garcia-Pacheco, R. (2015). Effect of common rooftop materials as support base for solar disinfection (SODIS) in rural areas under temperate climates. *Solar Energy*, Vol.115, pp.204-216. [En línea]. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.040>.

Agradecimientos

A todo el personal del el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina” por el apoyo brindado para la ejecución de esta investigación.