

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA**

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DESINFECCIÓN SOLAR SODIS EN FUENTES
DE AGUAS NATURALES UTILIZADAS PARA CONSUMO HUMANO EN
COMUNIDADES DE SAN JUAN SACATEPÉQUEZ, GUATEMALA**

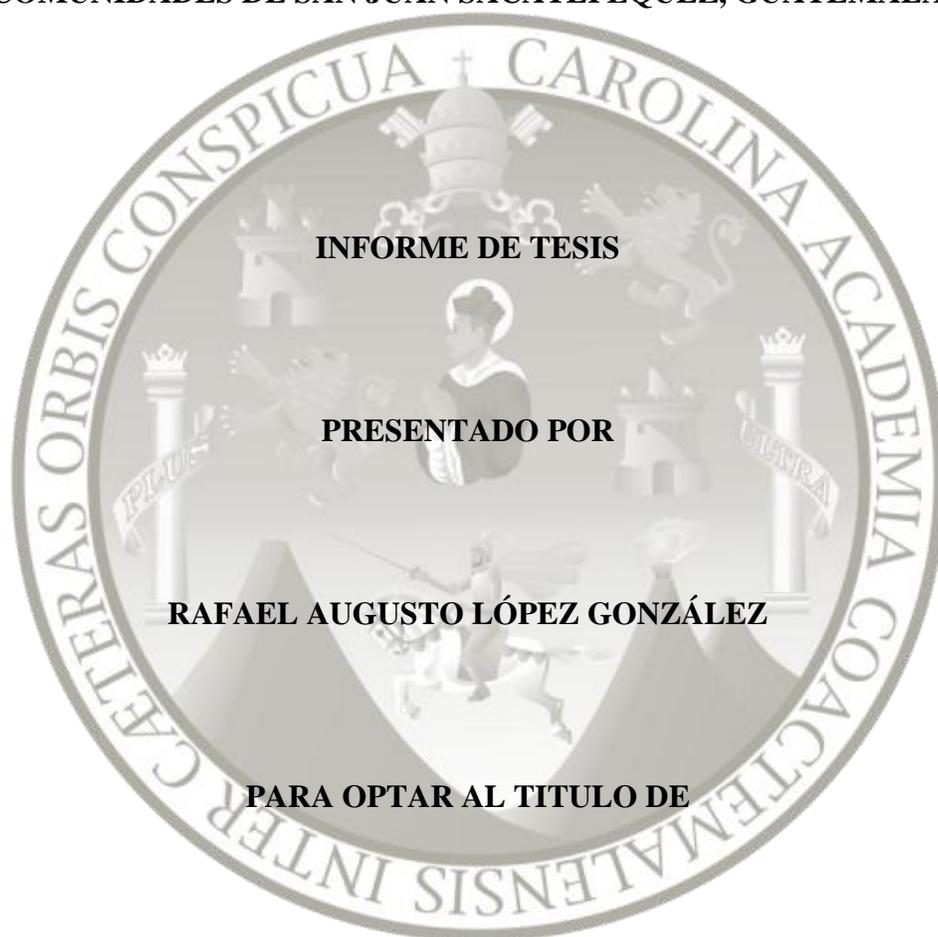
RAFAEL AUGUSTO LÓPEZ GONZÁLEZ

QUÍMICO BIÓLOGO

GUATEMALA, JUNIO DE 2011

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA**

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DESINFECCIÓN SOLAR SODIS EN FUENTES
DE AGUAS NATURALES UTILIZADAS PARA CONSUMO HUMANO EN
COMUNIDADES DE SAN JUAN SACATEPÉQUEZ, GUATEMALA**



INFORME DE TESIS

PRESENTADO POR

RAFAEL AUGUSTO LÓPEZ GONZÁLEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE

QUÍMICO BIÓLOGO

GUATEMALA, JUNIO DE 2011

JUNTA DIRECTIVA

Oscar Cóbar Pinto, Ph.D.	Decano
Lic. Pablo Ernesto Oliva Soto, M.A.	Secretario
Licda. Lillian Raquel Irving Antillón, M.A.	Vocal I
Licda. Liliana Vides de Urizar	Vocal II
Lic. Luís Antonio Gálvez Sanchinelli	Vocal III
Br. José Roy Morales Coronado	Vocal IV
Br. Cecilia Liska De León	Vocal V

DEDICO ESTE TRABAJO DE TESIS A

A mi Salvador y Dios Jesucristo.

A Guatemala mi amada Patria.

A la Universidad de San Carlos de Guatemala.

A mi asesora Licenciada María Beatriz López.

A toda mi familia y en especial a:

Mi amada esposa Jessica Cadenillas,

Mi amada hija Melany Michelle,

Mis padres Rafael López Molina y Martha Silvia González Amézquita de López,

Mis suegros Carlos Rodolfo Cadenillas y Miria Yolanda Cifuentes,

Mis hermanos: Vinicio, Argelia, Silvia y José Miguel,

Mis abuelos Argelia, María Mercedes, Octavio (+) y Rafael (+),

Mis sobrinos Andrea, Mónica, Ana Sofía, Avril y William,

Mis cuñados Hugo, Giovanni, William y Shirley,

Mis tíos y primos.

A mi iglesia Lluvias de Gracia Sede y en especial a mis pastores.

AGRADECIMIENTOS

Mi Señor y Salvador Jesucristo: por tener en sus manos mi vida y permitirme cumplir a su tiempo, este sueño tan anhelado. A ti sea la gloria y la honra.

El amor de mi vida, mi Jessica Cadenillas: por amarme, apoyarme y animarme para alcanzar mis sueños; Este título lleva el nombre de los tres. La amo con todo mi corazón.

Mi amada hija Melany Michelle: por tu paciencia y soñar juntos con este logro: ¡Dentro de unos años te tocará a ti y no olvides que toda sabiduría y toda ciencia proviene de Dios!

Mis padres Rafael López Molina y Martha Silvia González de López: Lo que hasta hoy he logrado y lo que seguiré cosechando es fruto de su amor, esfuerzo, sacrificio y oraciones. Muchísimas gracias, los amo.

Mis suegros: Ing. Agr. Carlos Rodolfo Cadenillas y Miria Cifuentes de Cadenillas, porque confiaron y nos han apoyado incondicionalmente. Muchas gracias.

Mis hermanos: Ustedes han sido mis mejores amigos, los amo.

Mis sobrinos: Andrea, Mónica, Ana Sofía, Avril y William.

Mis amados abuelos: Este logro es parte de su herencia.

Mis tíos y primos: Porque en algún momento de esta larga carrera me apoyaron y dieron palabras de aliento para seguir.

Mis cuñados: Muchas gracias por apoyarme.

Mi asesora Licda. Beatriz López, Q.B.: Muchísimas gracias por no perder y no negarme su confianza, paciencia y apoyo. Dios le bendiga.

Lic. Juan Mario Dary y Francis Villatoro, Ing. Juan Manuel Marroquín, Doña Regina, Doña Marieta (+); Dr. Estuardo Marroquín, Ing. Ricardo Marroquín; Ing. Oscar Estrada; Inga. Concepción de Corrales; Lic. Luís Caballeros; Lic. Rafael Jeréz (+); Oscar Cuellar; Licda. Lizeth Monney, Licda. Ana Rodas de García, Lic. Carlos Pérez; ¡Dios le bendiga!

Laboratorios LABIND, LAFYM y LABOCLIP, LABSAMA, AGROBIOTEK, VERTICAL y Laboratorio de microbiología del CDC de la Universidad Del Valle de Guatemala, Fundación SODIS Guatemala y Catholic Relief Service, Guatemala y en especial al Ing. Adán Pocasangre.

INDICE

I.	RESUMEN.....	1
II.	INTRODUCCIÓN	3
III.	ANTECEDENTES.....	4
A.	Microorganismos patógenos en el agua	4
B.	Indicadores microbiológicos de la calidad del agua	7
C.	Relación entre la salud, la calidad y el acceso al agua	11
D.	Métodos más comunes de desinfección de agua	15
E.	Métodos alternativos de desinfección de agua a nivel domiciliario	16
F.	Método de desinfección solar SODIS	20
G.	Cuantificación de coliformes totales y <i>Escherichia coli</i> por el método de número más probable Colilert®, basado en la tecnología del sustrato enzimático definido de IDEXX®	33
IV.	JUSTIFICACIÓN	35
V.	OBJETIVOS	36
VI.	HIPÓTESIS.....	37
VII.	MATERIALES Y MÉTODOS	38
VIII.	RESULTADOS.....	46
IX.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	52
X.	CONCLUSIONES	59
XI.	RECOMENDACIONES	60
XII.	REFERENCIAS	61
XIII.	ANEXOS	70

I. RESUMEN

SODIS es un método de desinfección solar que por efecto de la acción sinérgica de la radiación ultravioleta e infrarroja permite la desinfección de aguas contaminadas, de tal forma que puede lograrse la reducción de la carga microbiológica a niveles seguros para el consumo humano.

El objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia del método de desinfección solar SODIS en fuentes de aguas naturales que presentaron contaminación fecal y que son utilizadas para el consumo humano en comunidades de San Juan Sacatepéquez del departamento de Guatemala, región que pertenece a la zona climática de la Meseta y altiplanos.

El estudio se dividió en dos etapas: en la primera se determinó la calidad fisicoquímica y microbiológica de nueve puntos de captación de agua para consumo humano por las personas del área, seleccionados al azar, por conveniencia y fácil acceso; estableciéndose que las aguas en los nueve puntos si cumplían con los requisitos básicos para la aplicación del método SODIS, con turbiedades menores a 30 unidades nefelométricas de turbiedad UNT y contaminación por coliformes y *Escherichia coli*.

En la segunda etapa antes de la aplicación del método SODIS, se determinó el conteo de microorganismos heterótrofos por el método de vertido en placa, el conteo de bacterias del grupo coliforme total y *E. coli* por el método Colilert, luego se aplicó el método de desinfección solar en las aguas no tratadas de acuerdo a las especificaciones de la Fundación SODIS y por último se realizaron los análisis microbiológicos para establecer la eficiencia del método SODIS en esta área.

Las botellas con las muestras de agua no tratadas se expusieron por 8 horas a la luz solar, sin ningún material refractario y sin pintura negra en la parte baja, con el fin de aplicar el método en la forma más sencilla descrita en la literatura.

Los conteos de bacterias del grupo coliforme total antes y después de la aplicación de SODIS demostraron que hubo una reducción del 100% (<1 NMP/100 ml) en 13 (65%) de las 20 muestras analizadas después de la aplicación de SODIS, lográndose la reducción del número de microorganismos desde 10^4 hasta <1 NMP/100 ml en ocho horas bajo la luz solar. Los conteos de *E. coli* después de la aplicación de SODIS se redujeron el 100% (<1 NMP/100 ml) en 15 (75%) de las 20 muestras analizadas.

El análisis estadístico se realizó utilizando la prueba de hipótesis *t de Student* para un solo grupo de muestras pareadas con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$).

Al calcular el valor *p* se observó una reducción significativa entre los conteos antes y después de la aplicación de SODIS, alcanzándose un valor de 0.00072 para el conteo de heterótrofos y de 0.00001 para los

conteos de coliformes y *E. coli*. Esto significa que estadísticamente entre el antes y el después de SODIS si existe una diferencia significativa en el número bacterias heterótrofas, bacterias del grupo coliforme y *E. coli*.

Aunque en el 25% de las muestras expuestas a la radiación solar no se logró la reducción total de *E. coli*, estos resultados revelan que en las condiciones de prueba durante el mes de febrero en San Juan Sacatepéquez, SODIS si permite mejorar la calidad sanitaria del agua contaminada, ya que comparando los conteos obtenidos después de la aplicación de SODIS con los criterios de la Organización Mundial de la Salud para la clasificación del agua utilizada para consumo humano, se comprobó que la calidad sanitaria del agua tratada si mejoró en comparación con las muestras antes del tratamiento.

Al demostrar que el método de desinfección solar SODIS sí es efectivo para el tratamiento de aguas contaminadas utilizadas para el consumo humano en San Juan Sacatepéquez, mejorando la calidad sanitaria del agua que presenta contaminación fecal, se evidencia que es importante realizar estudios sobre la eficiencia del método SODIS de acuerdo a las características de cada una las zonas climáticas de la República de Guatemala, especialmente en las áreas en las que el agua para consumo humano presenta contaminación fecal y en las que los consumidores no cuentan con las posibilidades económicas para sostener y utilizar métodos tradicionales, como la clorificación o el uso de leña o combustibles para hervir el agua. De tal manera que al introducir el método SODIS en una comunidad, se cuente con una base científica que permita su correcta aplicación y máxima efectividad.

I. INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país que cuenta con una gran diversidad de fuentes de agua que abastecen a los habitantes de las áreas urbanas y las comunidades del área rural, sin embargo la mayoría de estas fuentes ya están contaminadas. En las áreas marginales y rurales en donde no hay acceso a sistemas de abastecimiento de agua potable, las condiciones sanitarias son extremadamente deficientes y la capacidad adquisitiva es baja, lo que ha provocado que las tasas de mortalidad y morbilidad por enfermedades transmitidas por el agua sean elevadas (1-10).

En los años setenta se iniciaron varios trabajos de investigación sobre el método de desinfección del agua, utilizando la luz solar y materiales de bajo costo, accesibles a comunidades en vías de desarrollo. Este método llamado SODIS, se basa en la acción sinérgica sobre los microorganismos patógenos de la radiación ultravioleta y altas temperaturas provocadas por la radiación infrarroja de la luz solar, lo cual permite obtener agua libre de microorganismos causantes de enfermedades al consumidor a nivel doméstico (11-17).

El método de desinfección solar SODIS es un método alternativo de desinfección de agua, económico y ambientalmente sostenible, accesible y sencillo de aplicar (11, 18-22), esto ha permitido que en las comunidades marginales y rurales en varios países alrededor del mundo donde actualmente es aplicado, el número de casos de muerte por enfermedades transmitidas por el agua disminuya considerablemente (12, 14, 15, 18, 23-28). En Guatemala SODIS ha sido aplicado en varias comunidades del altiplano (29). Luego del huracán Stan que en el año 2005 azotó varias regiones de Guatemala y la falta de agua segura provocada por este fenómeno natural, se han desarrollado proyectos de aplicación del método SODIS en comunidades afectadas (29) pero no se han realizado estudios microbiológicos que demuestren la eficiencia del método en cada área de aplicación (29). Para seleccionar el área en la cual realizar este estudio se tomó en cuenta su ubicación geográfica, la facilidad de acceso a las áreas y antecedentes de deficiencia en el suministro seguro de agua potable (30).

En base a estas especificaciones se consideró al municipio de San Juan Sacatepéquez como un área en la cual el método de desinfección solar SODIS puede ser de gran ayuda para el mejoramiento de la calidad de vida de sus pobladores. Este municipio del departamento de Guatemala se caracteriza porque en varias de sus comunidades no cuentan con los servicios básicos e infraestructura de abastecimiento y saneamiento de aguas (30). En este trabajo de investigación se aplicó el método de desinfección solar SODIS en fuentes de aguas naturales que presentaron diferentes niveles de contaminación y que son utilizadas para el consumo humano en comunidades de esta región, determinando la calidad microbiológica inicial y los aspectos fisicoquímicos que influyen sobre el método. Después de la aplicación de SODIS se evaluó su eficiencia determinando la calidad microbiológica de las aguas tratadas, para comprobar si fue efectivo o no en las fuentes de aguas naturales utilizadas para el consumo humano en esta región.

II. ANTECEDENTES

A. Microorganismos patógenos en el agua

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud OMS, las enfermedades diarreicas por causas infecciosas ocupan el tercer lugar como causa de mortalidad a nivel mundial, siendo los más afectados los países en desarrollo y principalmente los niños menores de 5 años de edad, los que son el 90% de las defunciones reportadas por enfermedad diarreica (30). La OMS estableció que el agua destinada al consumo humano no debe ser un vehículo transmisor de microorganismos patógenos (30-35). Sin embargo las enfermedades relacionadas con el agua son la causa principal de muertes y enfermedades alrededor del mundo (36, 37).

Las enfermedades infecciosas causadas por bacterias patógenas, virus, protozoos y parásitos son las más comunes y representan el más alto riesgo para la salud asociado con agua para consumo humano, además de que muchos de estos microorganismos tienen múltiples rutas de transmisión que incluyen los alimentos, el contacto persona a persona y la transmisión por vectores (11, 12, 34, 37, 38). Factores como la temperatura, la radiación ultravioleta solar, la capacidad de multiplicación en el agua, la cantidad de nutrientes, carbono orgánico biodegradable y la disponibilidad de oxígeno influyen en la persistencia de los microorganismos en el agua (12, 32). Es por esto que cuando los microorganismos abandonan el hospedero comienzan a perder su viabilidad de forma exponencial, por lo que deben hallar rápidamente un nuevo hospedero siendo más probable que estos se difundan por rutas de transmisión más directas, que por agua contaminada; es por lo que los microorganismos patógenos más comunes transmitidos por el agua poseen una alta patogenicidad y una elevada capacidad de sobrevivencia fuera del hospedero (11, 12, 34, 36 - 41).

En el Anexo No. 1 se presentan datos estimados para varios microorganismos patógenos de origen fecal y que son transportados por aguas contaminadas, de la cantidad excretada por una persona infectada, la máxima supervivencia en el agua y la dosis mínima para causar enfermedad en el ser humano.

Entre los años 1972 a 1999 se descubrieron 35 nuevos agentes patógenos, muchos de los cuales son considerados patógenos emergentes, debido a que después de varios períodos de inactividad han resurgido como causantes de enfermedades en los seres humanos o se han expandido a las áreas donde previamente no habían sido reportados, como por ejemplo *Helicobacter pylori*, microorganismo emergente que puede ser transmitido a través del agua (36, 40, 41). Algunos factores como los cambios ambientales, las nuevas tecnologías, avances científicos y cambios en el comportamiento y vulnerabilidad humana, permiten que después de un prolongado período de inactividad, estos microorganismos resurjan como patógenos para el hombre. En total 175 especies de agentes infecciosos de 96 géneros distintos fueron reclasificados como patógenos emergentes, de los cuales el 75% son especies zoonóticas (36, 40). Para el 2001 un total de 1415 especies incluyendo 217 virus y priones, 538 bacterias y rickettsias, 307 hongos, 66 protozoos y 287 helmintos ya eran considerados como microorganismos patógenos para el hombre (36).

Los datos obtenidos por el sistema mundial de vigilancia del medio ambiente (SIMUVIMA) y el programa de las naciones unidas para el medio ambiente (PNUMA), permitieron establecer el por qué los microorganismos patógenos transmitidos por el agua son una amenaza permanente para la salud pública en todo el mundo. De estos datos se estableció que:

- Las densidades más altas de coliformes fecales en un río, son mucho más elevadas en las regiones tropicales (aguas con temperaturas mayores de 10°C) que en las regiones templadas (aguas con temperaturas menores a los 10°C), debido al escaso tratamiento dado a las aguas residuales en países en desarrollo, especialmente en los países del tercer mundo.
- La existencia de cuerpos receptores, con temperaturas mayores a los 20°C, durante la mayor parte del año y una descarga constante de materia orgánica que las vuelven aguas ricas en nutrientes, contribuyen a elevar la carga microbiológica, favoreciendo el aumento de la densidad de coliformes fecales y la persistencia de algunos patógenos, tales como *Salmonella* spp., *Vibrio cholerae* y *Leptospira*.
- Algunos patógenos tienen la capacidad de persistir durante períodos de tiempo prolongados en aguas frías de bajo contenido de nutrientes, como las especies de *Campylobacter* spp., *Yersinia* spp., *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium* spp. (12, 32).

Se han detectado diversas fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas de las que se han aislado una gran cantidad de microorganismos patógenos al hombre. Entre estas fuentes se incluyen los desechos fecales de todos los animales de sangre caliente que llegan al agua y el suelo, los desechos filtrados de los rellenos sanitarios, efluentes de aguas residuales mal tratadas, tanques sépticos dañados o sobresaturados, nichos de fauna silvestre, ganado, aguas pluviales, desagües a nivel del suelo, desechos domésticos drenados hacia ríos, lagos y mares (12, 32-34, 37, 42).

En 2003, Miyares MR., realizó un estudio sobre la carga de coliformes y helmintos en aguas de afluentes y efluentes de una planta de tratamiento de aguas negras en la ciudad de Guatemala, en el cual logró identificar y cuantificar huevos de *Ascaris lumbricoides*, evidenciando que el tratamiento dado a las aguas residuales es inadecuado e ineficiente (1).

La presencia de microorganismos patógenos no se limita a las aguas residuales y superficiales contaminadas, en el Anexo No. 2 se presentan los diferentes tipos de microorganismos aislados en aguas tratadas destinadas para el consumo humano, debido a las grandes deficiencias en los procesos de potabilización de las aguas (32, 34). No hay límites inferiores tolerables en agua o productos de consumo humano para los microorganismos patógenos, ya que estos poseen características particulares que los distinguen de otros tipos de contaminantes:

- Los patógenos se encuentran en cantidades bajas y no están disueltos en el agua.
- Los patógenos se encuentran agrupados o adheridos a sólidos.
- La capacidad de producir infección depende de la invasividad y la virulencia del patógeno y de la inmunidad del individuo.
- La capacidad de reproducirse en el hospedero, alimentos y bebidas aumenta las probabilidades de infección.
- La respuesta a una dosis de patógenos no es acumulativa (11, 34).

Cuando en una población hay casos activos de alguna infección o hay personas portadoras, pueden ser un vehículo de contaminación de las aguas utilizadas para el consumo humano, como el lavado de alimentos, agua para beber, agua para higiene (baño personal), contacto en el lavado y hasta la inhalación de vapores de agua contaminada, resultando entonces, en una infección (34). Los agentes patógenos más frecuentes causantes de brotes epidémicos y asociados a diarrea infantil en países subdesarrollados son *Salmonella* spp., *Vibrio cholerae*, *Yersinia enterocolitica*, *Shigella* spp., *E. coli* enterotoxigénica, *Campylobacter jejuni*, *Cryptosporidium* spp., Rotavirus, Adenovirus 40 y 41; Astrovirus, *Giardia* spp., *Entamoeba histolytica* y *Dracunculus medinensis* (11, 12, 18, 32-34, 36, 38, 43, 44-47). En aguas recreacionales también se han reportado brotes epidémicos causados por *Shigella* spp., *E. coli*, *Leptospira*, *Giardia lamblia*, *Cryptosporidium*, Virus Norwalk y Adenovirus 3 (39, 45, 46).

El virus Norwalk, *Aeromonas hydrophila*, *Plesiomonas shigelloides*, *Vibrio parahaemolyticus*, *Yersinia enterocolitica*, *Isospora belli*, *Cyclospora cayetanensis* y *Mycobacterium avium*, también se han asociado a enfermedades diarreicas, pero aún se desconocen las vías por las que actúan (2, 32, 37, 48). Otros microorganismos causantes de enfermedades transmitidas por el agua son *Legionella* spp., que causa la enfermedad del legionario; *Naegleria fowleri*, causante de la meningoencefalitis amebiana primaria; *Acanthamoeba* spp., responsable de la meningitis amebiana y *Schistosoma* sp., que causa la esquistosomiasis, la que se transmite por contacto con el agua infestada con caracoles durante el baño o el lavado de ropa (34, 36, 39, 47, 48).

También se han reportado que cuerpos de aguas contaminados con aguas residuales causan lesiones patológicas en ojos, pulmones, piel, cerebro y eventualmente causan la muerte cuando están contaminadas por *Naegleria* o *Acanthamoeba* spp. (48); *Balantidium coli*, *Fasciola hepatica*, *Ascaris lumbricoides*, *Clonorchis* sp., *Trichuris trichura*, *Echinococcus* sp., *Necator americanus*, *Ancylostoma duodenale*, *Strongyloides stercoralis*, *Spirometra mansoni* y *Taenia solium* (34, 36, 39, 46, 47).

Las enfermedades causadas por estos parásitos se han clasificado de acuerdo a la forma como utilizan el agua en su ciclo de vida:

- Las enfermedades con base en el agua: en las que los organismos que pasan parte de su ciclo vital en el agua y otra parte como parásitos de animales, tales como la ascariasis, clonorquiasis, dracunculosis, paragonimiasis y la esquistosomiasis (37).
- Las enfermedades con base en vectores: las cuales son causadas por organismos que se transmiten por vectores que se desarrollan en el agua, como por ejemplo el paludismo, fiebre amarilla, dengue, enfermedad del sueño y la filariasis (37).

Los patógenos oportunistas son ubicuos y no son considerados formalmente como patógenos. Estos microorganismos son capaces de causar enfermedad en personas que presentan inmunodeficiencias, entre estos microorganismos están *Pseudomonas aeruginosa*, *Flavobacterium* spp., *Acinetobacter* spp., *Klebsiella* spp., *Serratia* spp., *Aeromonas* spp.; y cepas de crecimiento lento de *Mycobacterium* spp. (34). Otro grupo de microorganismos las *Cyanobacterias* o algas verdiazules, producen toxinas hepatotóxicas y neurotoxinas. Estas se encuentran en lagos o depósitos usados para el abastecimiento de agua para consumo, especies como *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Anabaena*, *Nodularia*, *Nostoc*, *Cylindrospermum* y *Aphanizomenon* producen estas toxinas que pueden producir la muerte por choque circulatorio y hemorragia hepática masiva en 24 horas (2, 34, 36, 40).

La transmisión del coronavirus responsable del SARS (Severe acute respiratory syndrome) por aerosoles contaminados con heces, reorientó la ruta de transmisión de algunos virus entre las cuales se considera el agua como una de las vías principales de transferencia (36).

B. Indicadores microbiológicos de la calidad del agua

Un microorganismo es considerado un indicador cuando cumple los siguientes criterios:

- Está universalmente presente en heces humanas y de animales de sangre caliente.
- Es fácilmente detectable por métodos sencillos.
- No se desarrolla en el agua en condiciones naturales.
- Su persistencia en el agua y las cantidades en que se eliminan durante el tratamiento de desinfección, son similares o mayores a las de los microorganismos patógenos (11, 12, 33, 34, 37, 40, 49).

1. Grupo coliforme

a. Coliformes totales

Se definen como bacilos Gram negativo de la familia *Enterobacteriaceae*, aerobios y anaerobios facultativos, no esporoformadores, que fermentan la lactosa en presencia de sales biliares, formando ácido y gas a 35°C en 48 horas; poseen actividad de la enzima β -Galactosidasa, produciendo un cromógeno amarillo de 8 a 24 horas a 35°C en medios cromogénicos (33, 34, 37, 40, 44, 45, 47, 49-52).

b. Coliformes fecales

Al igual que los coliformes totales, son bacilos Gram negativo de la familia *Enterobacteriaceae*, aerobios y anaerobios facultativos, no esporoformadores, que fermentan la lactosa con producción de gas y ácido de 44.5°C a 45.5°C. Las especies que pertenecen a este grupo son:

- *Escherichia coli*
- *Citrobacter freundii*
- *Enterobacter* spp. (incluye *E. agglomerans*, *E. aerogenes* y *E. cloacae*)
- *Klebsiella pneumoniae* (33, 34, 40, 44, 45, 49-51).

En las heces que defeca una persona en veinticuatro horas, existen aproximadamente 2×10^3 millones de coliformes fecales, mientras que en aguas residuales sin tratar el número de coliformes fecales por 100 ml es de 8.3×10^6 . La diferencia es por la gran dilución que sufren, en las descargas de inodoros, agua de cocinas, aguas de lavado y otras descargas a los desagües (32).

c. *Escherichia coli*

Forma parte de la microbiota intestinal del hombre y de los animales de sangre caliente, su presencia en los alimentos y agua implica contaminación fecal, por lo que es utilizado rutinariamente con indicador de contaminación de este tipo (43). Perteneció a la familia *Enterobacteriaceae*, es un bacilo Gram negativo, no esporoformador, mesófilo y móvil que posee las siguientes características bioquímicas:

- Fermenta la lactosa a 35°C y a 44.5°C en 48 horas.
- Produce indol a partir del triptófano.
- Es citocromo-oxidasa positivo.
- Posee actividad β - Galactosidasa (ONPG) positivo.
- Posee actividad β - Glucuronidasa (MUG) positivo, produciendo fluorescencia bajo la luz UV-A. a 366 nm.
- Urea negativo.
- IMViC:
 - o Tipo I: +, +, -, -.
 - o Tipo II: -, +, -, - (33, 34, 37, 40, 44, 45, 47, 49-53).

Aunque *E. coli* es utilizado mundialmente como un indicador de contaminación fecal, los virus entéricos y los helmintos son más resistentes a los desinfectantes, por lo que la ausencia de *E. coli* no es una garantía absoluta de que el agua esté libre de estos microorganismos (33). Actualmente se realizan estudios para determinar si esta bacteria debe ser considerada un patógeno transmitido por el agua o no ya que la capacidad de las diferentes cepas de provocar enfermedades diarreicas es alta (54).

2. Estreptococos fecales

Este grupo está formado por especies de los géneros *Streptococcus* y *Enterococcus*. De acuerdo a los cambios taxonómicos del género *Enterococcus*, ahora este comprende todas las especies de estreptococos que comparten propiedades bioquímicas y toleran condiciones de crecimiento desfavorable, tales como *E. avium*, *E. casseliflavus*, *E. cecorum*, *E. durans*, *E. faecalis*, *S. faecium*, *S. gallinarum*, *E. hirae*, *E. malodoratus*, *E. mundtii* y *E. solitarius*. Generalmente se aíslan de heces de origen humano y animal. Al género *Streptococcus* actualmente pertenecen las especies *S. bovis* y *S. equinus*, las cuales poseen el antígeno D del grupo de Lancenfield's y también se consideran estreptococos fecales (33, 34, 37, 40, 44, 45, 50).

Los estreptococos fecales son muy buenos indicadores para determinar el grado de contaminación de aguas recreacionales, ya que poseen una resistencia mucho más alta a los desinfectantes como el cloro, que los coliformes y *E. coli*; y posee una alta resistencia al secado. Estudios de aguas de playas de baño y piscinas, indican que la gastroenteritis asociada a bañistas está relacionada directamente a la calidad del agua y que los *Enterococcus* en este tipo de aguas, son los indicadores más eficientes de contaminación fecal (33, 34, 44, 45, 50); asimismo el grupo de estreptococos son un indicador importante de contaminación fecal cuando se realizan controles sistemáticos después de la colocación de nuevas tuberías o reparación de los sistemas de distribución (33, 34, 44).

3. Esporas de clostridios sulfito reductores

Bacilos Gram positivo pertenecen al género *Clostridium*, son anaerobios, esporoformadores, que reducen el sulfito a sulfuro; normalmente se aíslan de heces, suelos y aguas contaminadas, aunque en cantidades mucho menores que *E. coli*; se utilizan para la evaluación de los procesos de desinfección de agua y la calidad higiénica de alimentos de origen animal. La principal especie es *Clostridium perfringens* y aunque no se recomienda su uso para vigilancias sistemáticas, su alta resistencia a elevadas temperaturas, desecación, pH extremos, falta de nutrientes y capacidad de acumulación; y en consecuencia su detección a distancias bastante alejadas del foco de contaminación o el largo tiempo que pueden sobrevivir en el agua, permiten la detección de contaminación fecal antigua (11, 33, 34, 40, 44, 45, 55).

4. *Pseudomonas aeruginosa*

Bacilo Gram negativo no esporoformador y no fermentador de carbohidratos, produce el pigmento pircianina que lo caracteriza; se aísla de heces en mucho menor cantidad que *E. coli*, de los ambientes húmedos, agua, suelos y vegetales; es un patógeno oportunista, que se halla en agua cruda, en presencia o ausencia de coliformes en agua para consumo (44, 47); tiene la capacidad de formar biofilms en tuberías y sistemas de aire acondicionado. Es utilizado como un indicador de contaminación en procesos de producción de productos farmacéuticos, agua envasada en áreas de cuidados intensivos y pediatría en hospitales (43, 44).

5. Conteo heterotrófico

Los heterótrofos son microorganismos que requieren carbono orgánico para su crecimiento, entre los que se incluyen bacterias, mohos y levaduras. Los conteos de heterótrofos incluyen microorganismos considerados como microbiota normal del agua y organismos derivados de la contaminación. Se utilizan diversos métodos para cuantificar la cantidad de microorganismos heterotróficos en el agua que se basan en varias condiciones como diferentes rangos de temperatura, tiempos de incubación y porcentaje de nutrientes. Un alto número de heterótrofos en una muestra de agua se debe a factores como fracciones de tubería donde se forman biofilms, lodos, uniones, incrustaciones, grietas o contacto con aguas contaminadas y suelos. (33, 34, 37, 50, 56, 57).

El conteo de heterótrofos se utiliza con diferentes objetivos:

- Para validar, comprobar la efectividad y realizar monitoreos de procesos de desinfección de agua y como un indicador indirecto de remoción de patógenos y calidad de agua para consumo humano.
- Como una medida de recrecimiento que puede o no tener significado sanitario.
- Como una medida de la posible interferencia con la detección de coliformes en medios con lactosa (33, 34, 37, 49, 50, 56).

El conteo heterotrófico también provee una estimación importante sobre la distribución de los microorganismos ambientales y patógenos en el agua. Luego del tratamiento de desinfección del agua los microorganismos patógenos pueden reagruparse y ser liberados en grupos aislados en el sistema, lo que puede provocar que algunos usuarios de los sistemas de aguas estén expuestos a dosis más altas que otros (57).

6. Colifagos y otros probables indicadores

Los bacteriófagos son virus capaces de poder elegir como célula hospedera a una bacteria, a este grupo pertenecen los colifagos, los cuales infectan bacterias del grupo coliforme. En aguas donde hay coliformes también se aíslan colifagos (33, 34, 37, 40, 45, 47, 50, 58); en 2001 Estrada WA., determinó la relación que existe entre la presencia de colifagos y *E. coli* en aguas de la ciudad capital de Guatemala, encontrando una relación directa entre ambos tipos de indicadores (3). Estos microorganismos no abundan en heces recientes de seres humanos o animales, pero sí en aguas residuales (33, 34, 40). Otros probables indicadores, utilizados con poca frecuencia por su corta supervivencia en el agua y su escaso número en heces son las especies de *Bifidobacterium*, *Bacteroides fragilis* y *Cryptosporidium* sp. (33, 34, 45).

En 2003, Jiménez MA. *et al*, propuso los Teschovirus como indicadores de contaminación fecal específico de ganado porcino. También De Motes CM *et al*, en 2004, propuso géneros de Adenovirus de origen bovino, porcino y ovino como indicadores de contaminación de aguas superficiales (53, 59).

Indicadores químicos de contaminación fecal pueden ser utilizados, como la determinación de esteroides fecales y cafeína (45).

C. Relación entre la salud, la calidad y el acceso al agua

1. A nivel mundial

Cada año la incidencia de muchas enfermedades relacionadas con los microorganismos transmitidos por el agua va en aumento (36, 37). En el año 2000 se calculó que aproximadamente 1100 millones de personas en el mundo no tenían acceso a fuentes de abastecimiento de agua y 2400 millones no contaban con ninguna clase de instalación de saneamiento mejorada, localizándose la mayor parte de estas personas en el continente asiático (11, 12, 23, 60). Se han calificado como abastecimientos mejorados de agua, la conexión domiciliaria, grifos públicos, pozos perforados, vertientes protegidas y recolección de agua de lluvia; sin embargo, la calidad microbiológica del agua de estas fuentes se ve afectada por operaciones y mantenimiento deficientes de los sistemas, contaminación secundaria durante la recolección, su transporte y almacenamiento (11).

Se considera que una población no cuenta con agua segura, cuando no posee un sistema público de abastecimiento de agua potable, o cuando teniéndolo, éste funciona de manera intermitente o deficiente (38, 61), según el informe de evaluación global de suministro de agua y saneamiento del año 2000 aproximadamente 4 mil millones de casos de diarrea al año, provocan de 2.2 a 3 millones de muertes, principalmente en niños menores de 5 años (32, 11, 12, 18, 60, 62- 64), de las que del 80% al 90% de muertes infantiles, son causadas por enfermedades diferentes al cólera (32, 11, 62, 64); el informe también indica que 200 millones de personas en el mundo están infectadas por la esquistosomiasis y que los parásitos intestinales infectan alrededor del 10% de la población en los países en desarrollo (60).

La falta de suministro público de agua potable o sistemas de tuberías dañadas, obliga a las personas del área rural a consumir aguas superficiales, por lo que los pobladores de estas áreas están expuestos a considerables riesgos de salud (19, 32, 38, 64, 65). Cada año alrededor de 3.5 millones de personas mueren por enfermedades relacionadas con el consumo y uso de agua contaminada, la morbilidad total se calcula en unos 4 billones de episodios anuales, de los cuales aproximadamente el 30% están relacionados con agua contaminada (11, 48, 62, 66).

Un reflejo de la alta incidencia de enfermedades infecciosas transmitidas por agua contaminada en los países subdesarrollados, son las desigualdades sociales y económicas, siendo las personas pobres las que más sufren este tipo de enfermedades; esto sumado a la expansión desordenada de las comunidades, la explosión demográfica y la migración hacía las ciudades desde las áreas rurales, hacen que los sistemas no sean funcionales, debido a la presión excesiva sobre las barreras infraestructurales de saneamiento (32, 40, 62, 64, 67).

Actualmente varias comunidades de América Latina, no cuentan con los servicios básicos de energía eléctrica y un suministro seguro de agua potable (38, 64, 68), en 1984, la Organización Panamericana de la Salud OPS, determinó que el 75% de los sistemas de aguas municipales y comunitarios de América Latina y el Caribe eran inadecuados o no existían; y que el 90% de los pueblos y aldeas con menos de diez mil habitantes carecían totalmente de sistemas de desinfección de agua (32). Entre los años de 1991 y 1992, hubo más de 5.9×10^5 casos de cólera y más de 5×10^3 muertes y se reportaron como los principales vehículos de microorganismos patógenos el hielo y los abastecimientos de agua potable; además de que surgió la alerta de que al activar una ruta de propagación de estos microorganismos se activan otras vías (37, 67, 69).

En 1994, la OPS también determinó que 91 millones de personas en 17 países de América Latina y el Caribe no tenían acceso a fuentes de agua segura y que las enfermedades diarreicas se contaban entre una de las cinco causas principales de muerte en niños menores de 1 año y como la primera causa de muerte en niños entre uno a cuatro años de edad (32).

Según la evaluación global 2000, hay una gran diferencia entre la población urbana con acceso a agua potable que es de aproximadamente del 93% y la población rural que tiene el 62%, mientras que el porcentaje de acceso al saneamiento para la población urbana es del 87% y para la población rural es del 49% (60). Este reporte también incluye que Rotavirus, *E. coli* enterotoxigénica, *Shigella* spp, *Campylobacter jejuni*, *Vibrio cholerae* y *Cryptosporidium parvum* se encontraban entre los agentes más importantes causantes de enfermedades diarreicas y deshidratación (32, 48).

2. En Guatemala

Guatemala se halla comprendida entre los paralelos 13°44' a 18°30' latitud Norte y entre los meridianos 87°24' a 92°14' al Este del meridiano de Greenwich. Su extensión territorial es de aproximadamente 108,889 Km², presenta dos estaciones al año, su clima es variado de acuerdo a su topografía y geografía, por lo tanto puede ir de cálido a templado o muy frío, dividiéndose en 6 zonas climáticas: Las planicies del Norte, la Franja Transversal del Norte, La Meseta y Altiplanos, La Boca Costa, La Planicie Costera del Pacífico y la Zona Oriental. Geográficamente La República de Guatemala esta dividida en 8 regiones, 22 departamentos y 331 municipios. De acuerdo al censo de 2002, el país cuenta con 11, 237,196 habitantes, de los cuales 2, 541,581 de personas se encuentran en el departamento de Guatemala (70). La potabilización del agua se realiza en 32 plantas de tratamiento, de las cuales 5 abastecen la ciudad capital y el resto se encuentran en las cabeceras departamentales y municipales de la república (4).

Para la evaluación global 2000, Guatemala reportó que el 97% de la población de las áreas urbanas y el 88% del área rural estaban abastecidas de agua segura (60, 71). Para el 2004 se reportó que el 89% de la población de las áreas urbanas y el 10% de las áreas rurales tenían conexión al sistema de distribución de agua potable, quedando solamente el 1% de la población sin cobertura (72).

En 2002 el Ministerio de salud pública y asistencia social de Guatemala, estableció que las mujeres y los niños recolectan entre 40 a 60 litros diarios de agua por día, para higiene personal, lavado, higiene y preparación de alimentos y que los hombres cuando acarrear agua, lo hacen con propósito de venta y no para uso domiciliario (73).

Estrada WA, en 2001 estableció que las aguas obtenidas de pozos del área de la ciudad capital, presentaban niveles de contaminación microbiológica bajos (3); mientras que en otros estudios se ha demostrado la alta contaminación de origen fecal de las aguas superficiales como el lago de Amatitlán, los ríos que desembocan en el y ríos que abastecen las principales plantas de tratamiento de la ciudad capital y sus alrededores, debido a las descargas industriales y domiciliarias que se vierten directamente a estos cuerpos de agua sin ningún tratamiento (1, 3-7).

En 2003, Down SE. *et al.*, comprobaron por PCR la presencia de *Cyclospora cayetanensis*, *Encephalitozoon intestinalis* y *Cryptosporidium parvum* en muestras de aguas de fuentes utilizadas para consumo humano en áreas rurales en el perímetro de la ciudad capital de Guatemala, en las cuales inicialmente aislaron *Giardia* spp. (2).

En Guatemala prevalecen las enfermedades diarreicas como una de las cinco primeras causas de morbilidad infantil, ocasionada por la falta de agua apta para consumo humano, además se detectan frecuentemente brotes de fiebre tifoidea y cólera en las épocas lluviosas (4, 8). En 1991 se reportó el primer caso de cólera, en el departamento de San Marcos; a fines de este mismo año la epidemia ya se había extendido a los 22 departamentos de la república, siendo los más afectados Chiquimula, Zacapa, Suchitepéquez, Escuintla, Sololá, El Progreso, Jutiapa, Retalhuleu, Guatemala y Santa Rosa. A finales de 1993 se reportó una tasa de incidencia acumulada de 3.16 por cada 1000 habitantes. En esta epidemia se identificó el agua como el principal vehículo transmisor de la bacteria (8, 9, 32, 60).

En 1994, la OPS realizó un estudio, haciendo una comparación sobre el promedio per cápita de compras anuales de cloro para desinfección del agua y los casos acumulados de cólera por 1000 personas, siendo Guatemala el país de Centro América que más casos presentó en relación inversa a la cantidad de cloro utilizado (32, 62).

La situación ideal en relación al acceso al agua segura, es que cada hogar en las zonas urbanas y rurales esté conectado a sistemas de distribución de agua, con servicio las 24 horas del día, todos los días (38), sin embargo no se ha cumplido. En 1999, se estimó que la cobertura de agua en el área urbana era del 98.76% y en el área rural era del 70.30% y que el 40% del agua del área urbana y el 15% del agua del área rural se cloraba (4). Esta diferencia bien marcada entre las condiciones de vida en la ciudad y las del campo es debido a que la mayoría de personas de las áreas rurales no cuenta con los servicios básicos en cuanto a sistemas de

distribución de agua potable, infraestructura sanitaria, como letrinas y drenajes; el agua es obtenida de grifos públicos, pozos artesanales, tanques de abastecimiento y fuentes superficiales (9, 10).

La falta de estos servicios sanitarios, además de la práctica de fecalismo al aire libre provoca la contaminación de las fuentes principales de agua en estas poblaciones (9). De cada 100 niños y niñas menores de 5 años, 44 presentan retraso en su crecimiento por desnutrición, los niños y niñas se ven forzados a trabajar en labores del campo u otros trabajos y son expuestos a condiciones tales como dormir en el suelo, el consumo de agua y alimentos contaminados, enfermedades pulmonares, diarreas, picaduras de insectos y mordeduras de animales. Se ha calculado que en el campo de cada 100 personas, 81 viven en pobreza, lo que equivale al 81.4% de la población total del área rural (10).

3. En San Juan Sacatepéquez, Guatemala

San Juan Sacatepéquez es un municipio del Departamento de Guatemala, localizado a 30 Km de la ciudad capital, limita al Norte con el municipio de Granados, al Sur con el municipio de San Pedro Sacatepéquez, al Oriente con los municipios de San Raymundo y San Pedro Sacatepéquez, al Occidente con los municipios de San Martín Jilotepeque, el Tejar y Santo Domingo Xenacoj; su extensión territorial es de 242 Km² y se encuentra a una altura de 1845 metros sobre el nivel del mar a una latitud de 14°43'00', longitud 90°38'36'; cuenta con una villa, trece aldeas, veintinueve caseríos, siete lotificaciones o colonias, tres comunidades agrarias y setenta y ocho fincas. Se encuentra dentro de la zona climática de La Meseta y Altiplanos. De acuerdo al censo de 2002, San Juan Sacatepéquez cuenta con 152,583 habitantes y 32,211 viviendas (70).

La mayor parte de las personas viven en grupos de 5 o más personas, en pequeñas casas con piso de tierra, y muchas de estas familias no cuentan con servicios sanitarios o letrinas por lo que practican el fecalismo al aire libre. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la mortalidad infantil se ha calculado en 47.7/1000 habitantes y el 51% de los niños en el primer año de escuela, reúnen las condiciones moderadas o severas de un mal desarrollo. El agua superficial es utilizada y obtenida de pozos poco profundos, ríos y nacimientos que regularmente están contaminados con heces humanas y animales, esporádicamente y en pocas comunidades, se utiliza agua de camiones cisternas, los cuales rara vez proveen agua clorada. El agua es almacenada en recipientes plásticos de boca ancha con capacidad para 10-15L (30).

Por estas características la aplicación de métodos de desinfección de aguas a nivel casero en ésta área, ha permitido reducir la incidencia de enfermedades diarreicas, tales como el uso de un producto precipitante, coagulante, floculante y desinfectante logrando reducir la carga microbiológica, orgánica y de metales pesados, de tal forma de que se logró mejorar la calidad microbiológica y fisicoquímica de las aguas tratadas (74). En otro estudio se determinó, en un período de un año, como el uso de este método de desinfección de agua a nivel casero disminuyó la incidencia de episodios de diarrea en un 29% entre las familias de las comunidades estudiadas (30). Al igual que estos estudios, SODIS puede ser una opción económicamente

accesible a las familias de bajos recursos para el tratamiento de aguas para consumo humano a nivel casero, que permita disminuir los índices de enfermedades diarreicas en áreas rurales y marginales.

D. Métodos más comunes de desinfección de agua

1. Clorinación

En América Latina la clorinación es uno de los métodos más utilizados para la desinfección de agua y prevención de enfermedades de origen hídrico (11, 12, 32, 33, 35, 37, 38, 67, 69). En 1996, el centro para el control y prevención de enfermedades de los Estados Unidos (CDC) y la organización panamericana de la salud (OMS/OPS), crearon el sistema de agua segura, el cual es una intervención a nivel domiciliario utilizando soluciones de hipoclorito de sodio fabricadas a nivel comunitario utilizando celdas electrolíticas. Este mismo año el CDC probó el sistema de agua segura, entre vendedores de alimentos en los mercados de la ciudad capital de Guatemala, en este estudio se observó una disminución significativa en la cantidad de coliformes en el agua almacenada y bebidas preparadas por los vendedores.

En año 2002, en México se desarrolló un proyecto de potabilización de agua a nivel comunitario utilizando el método de producción de cloro con celdas electrolíticas, logrando mejorar la calidad microbiológica del agua en comunidades en las cuales no contaban con plantas de clorinación (61-66).

A pesar de las propiedades bactericidas del cloro, en el Anexo No. 3 se muestran los datos reportados sobre la resistencia al cloro a concentraciones admisibles para el agua potable, de varios microorganismos patógenos e indicadores de contaminación, además se ha observado que el grupo de enterococos presenta más resistencia al cloro que *E. coli* y los coliformes, habiéndose calculado que para reducir 2-log se deben utilizar 5mg.min/L, comparado con los 120mg.min/l necesarios para *Enterococcus faecalis* (38, 45).

La cloración, ha tenido un papel muy importante en la prevención de enfermedades transmitidas por agua contaminada, por lo que no se deben incrementar los riesgos microbiológicos por tratar de reducir los riesgos químicos potenciales asociados a los subproductos de la desinfección. La máxima prioridad es reducir los riesgos microbiológicos agudos (11, 12, 32, 33, 35, 37, 38, 67, 69). El agua clorada es muchas veces rechazada por los consumidores debido al olor y sabor característicos que confieren al agua, además de presentar problemas de proceso como la dosificación y distribución temporal e informal (9, 12, 18, 19, 76).

2. Ozonificación

El ozono es el desinfectante más eficaz para todo tipo de microorganismos, sin embargo presenta desventajas como su baja residualidad, crecimiento de microorganismos después de exposición, alto costo y toxicidad de subproductos (32, 35).

3. Radiación ultra violeta

La radiación UV es un método efectivo de desinfección en aguas claras, sin embargo su efectividad se ve afectada significativamente en aguas turbias o con altos niveles de hierro, nitratos y sulfatos; además no tiene efecto residual por lo que la probabilidad de recontaminación es bastante alta (35). En 2003, Maya C *et al.*, irradiaron efluentes de aguas negras con diferentes dosis de radiación UV; los resultados que obtuvieron mostraron que la dosis más efectiva para la inactivación de coliformes fecales, estreptococos fecales y *Salmonella typhi* fue de 15 mW.s/cm² y para trofozoitos de amebas la dosis más efectiva fue de 60 mW.s/cm² (48).

4. Calentamiento, ebullición y pasteurización del agua

En algunas regiones en desarrollo, el 50% de la madera talada se utiliza para el calentamiento de agua y cocción de alimentos (23), hervir el agua es el método más difundido a nivel mundial para su desinfección; es un método sencillo, fácil de entender e implementar. A nivel del mar el agua debe de ebullicir por un minuto, añadiendo un minuto más por cada mil metros de altitud; sin embargo las desventajas de este método son la cantidad de energía requerida, ya que para llevar a ebullición el agua por dos minutos, se necesita un kilogramo de leña por litro de agua, lo que hace que este método sea económica y ambientalmente insostenible; y la alta probabilidad de recontaminación por la manipulación de los recipientes; (9, 11, 12, 20, 33, 35, 38, 63, 69, 76); esto significa que para hervir 40 litros de agua (cantidad por día aproximada para una familia de 5 personas), el costo económico y ambiental es altísimo (32).

Entre los años 1980 y 1995, a consecuencia de actividades de tala, agricultura, construcción y fenómenos como el crecimiento demográfico, plagas, incendios y otros, se deforestaron 180 millones de hectáreas alrededor del mundo, equivalente al área del territorio mexicano (23). En el proceso de pasteurización la temperatura del agua se lleva de 70°C – 75°C por aproximadamente 10 minutos, dependiendo de la altitud del lugar (11, 12, 63).

E. Métodos alternativos de desinfección de agua a nivel domiciliar

En 2007 la OMS estimó que el 94% de los casos de diarrea a nivel mundial podían reducirse mediante modificaciones del medio ambiente familiar a través de intervenciones que permitan aumentar la disponibilidad de agua limpia y mejorar el saneamiento y la higiene familiar (77).

La principal preocupación de los países en desarrollo, debe ser el impedir que el agua siga siendo el vehículo de transmisión de enfermedades entéricas, bajo esta perspectiva el uso de cloro para la desinfección del agua es la opción con mejor relación costo/beneficio, sin embargo, para poder llevar este recurso a las poblaciones alejadas o de bajos recursos influye mucho la capacidad técnica existente en el país como de la capacidad y voluntad de pago de la población, por lo que la propuesta de métodos alternativos de menor costo que la clorinación es una buena opción. Cuando no existe un abastecimiento de agua corriente seguro y continuo en el hogar, la desinfección domiciliar y el almacenamiento seguro constituyen las barreras más importantes contra las enfermedades transmitidas por el agua (32, 38).

El CDC presentan los métodos alternativos más utilizados a nivel mundial para la desinfección de agua a nivel domiciliar que son la aireación, el cual se realiza por agitación de un contenedor, el uso de filtros cerámicos que por gravedad el agua pasa a través de un cilindro de cerámica; el uso de filtros de arena rápidos y lentos que utilizan arena gruesa o fina respectivamente, para eliminar impurezas por sedimentación adsorción y tamizado; el método de absorción o filtros catalíticos, en el cual el agua pasa a través de un medio de filtro molido muy finamiento compuesto por zeolita; el almacenamiento y sedimentación, en el cual se añade agua sin tratar a una primera olla y por medio de un sifón se vierte a una segunda olla y 24 horas después a una tercera y por último el método de tamizado en el cual el agua pasa a través de la tela de monofilamento de agua, utilizado en Nueva Guinea para eliminar los copépodos que contienen larvas del nematodo de Guinea (63).

La OPS recientemente declaró que es imperativo desarrollar métodos prácticos y económicos para ayudar a las personas sin acceso a agua segura a obtenerla (11, 32, 61); y la OMS reconoció la necesidad de implementar métodos domésticos de tratamiento de agua para reducir el porcentaje de enfermedades transmitidas por el agua en comunidades en desarrollo (66), por lo que es indispensable que la promoción de métodos alternativos de tratamiento de agua a nivel doméstico vaya de la mano de la capacitación sobre buenos hábitos de higiene, tales como el lavado de manos, utilizar letrinas, manipular y almacenar agua en forma segura (11, 12, 37, 61).

A nivel centroamericano se han realizado proyectos de implementación de métodos alternativos de desinfección de agua para consumo humano (11); en Honduras, el fondo hondureño de inversión social (FHIS) y la fundación internacional de desinfección solar (SODIS) trabajaron en la implementación de diferentes soluciones, al problema de como proveer y desinfectar agua para consumo humano, sencillas de implementar, a bajo costo y fácil mantenimiento; en poblaciones aisladas, tales como el bombeo manual a distancia, la captación de agua de lluvia y el método de desinfección solar SODIS, logrando que varias de estas poblaciones mejoraran su calidad de vida al tener acceso al agua segura (76).

Al establecer un sistema de desinfección de agua o alimentos a nivel domiciliario, deben de tomarse en cuenta todos los aspectos siguientes, no debiendo de obviarse ninguno de ellos, para no poner en riesgo la eficacia del proceso:

- La fuente de abastecimiento, la cual debe de estar protegida lo mejor posible de cualquier factor de contaminación.
- La conducción del agua o sea, el proceso de transporte del agua desde la fuente de abastecimiento hasta el domicilio.
- La producción local del desinfectante, en los casos en los cuales en la comunidad se procese el desinfectante utilizado.
- Distribución del desinfectante, al igual que el punto anterior, sistemas en los que la comunidad produce o compra el desinfectante.
- El proceso de desinfección y almacenamiento del agua tratada, en recipientes que faciliten la correcta manipulación.
- Que el agua sea utilizada para bebida, higiene bucal, lavado de loza, alimentos, baño, etc.
- Que las personas apliquen procedimientos adecuados de higiene.
- La gestión comunitaria del sistema de desinfección, con la cual debe de asegurarse la auto-sustentabilidad del sistema.
- El control continuo de todos los componentes y aspectos del sistema de desinfección, que cubre desde la fuente hasta el consumo.
- La vigilancia, por parte de un ente externo que supervisa las labores de control y la prevalencia de diarreas en niños menores de 5 años, con el fin de determinar la efectividad del programa de desinfección de agua a nivel domiciliario (59).

Varias investigaciones han establecido que el tratamiento y el almacenamiento seguro del agua doméstica ayuda a mejorar considerablemente la calidad microbiológica del agua, reduciendo significativamente la diarrea, de forma altamente eficiente y sostenible, por lo que pueden ser utilizados y adaptados rápidamente en las poblaciones vulnerables, siendo una de las intervenciones más eficientes en materia de agua, saneamiento y salud (30).

1. Aireación

Esta se logra agitando fuertemente un recipiente con agua hasta la mitad o permitiendo que el agua gotee a través de una o más bandejas perforadas que contienen pequeñas piedras. La aeración aumenta el contenido de oxígeno en el agua, eliminando sustancias volátiles como el sulfuro de hidrógeno, causante de mal olor y sabor en el agua; oxida el hierro y el manganeso, formando precipitados que pueden eliminarse por filtración o sedimentación (63).

2. Coagulación y floculación

La coagulación consiste en agregar al agua una sustancia que neutralice las cargas de las partículas dispersas en el agua, permitiendo que las partículas que se repelen entre sí, sean atraídas unas a otras y así facilitar su aglomeración durante el proceso de floculación. Este proceso consiste en una agitación suave y lenta del agua que permite que estos aglomerados cada vez sean más grandes y puedan ser separados por sedimentación o filtración. Algunos de los floculantes más utilizados son el sulfato de aluminio, el sulfato de hierro y el cloruro férrico; además pueden utilizarse floculantes naturales como las semillas en polvo del árbol *Moringa oleifera* (Marango) y arcillas como la bentonita; estos procesos, unidos al proceso de desinfección permiten reducir la carga orgánica e inorgánica (como el arsénico) del agua tratada (11, 33, 34, 63, 66).

3. Sedimentación por almacenamiento prolongado

Cuando se almacena agua por un período de tiempo prolongado (generalmente un día), puede lograrse la reducción de más del 50% de bacterias y sólidos en suspensión. Tal es el caso del sistema de tratamiento de tres ollas, en las que se echa agua sin tratar a la primera olla, luego el agua se decanta en la segunda después de 24 horas y se vierte en la tercera después de otras 24 horas (11, 63).

4. Tamizado

En este método se utiliza un paño de algodón limpio que permite eliminar un pequeño porcentaje de sólidos suspendidos. Este método se utiliza en las zonas donde se encuentra el gusano de Guinea (63).

5. Filtración

Dentro de los procesos de filtración se incluyen el tamizado mecánico, la absorción, la adsorción y la utilización de filtros caseros de cerámica, piedra y arena, que remueven gran parte de la materia sólida disuelta en el agua, pero no toda la carga microbiológica, estos filtros son generalmente deficientes en relación a la mejoría de calidad microbiológica del agua, además presentan problemas como el mal manejo, obstrucción por saturación, fisuras y otros (11, 12, 19, 38, 61, 63).

6. Desinfección solar

En este método se utilizan la radiación ultravioleta y la radiación infrarroja (IR) obtenidos por la exposición directa al sol de recipientes plásticos con agua, creando un efecto sinérgico para la destrucción de microorganismos patógenos en agua (11-14, 18, 20, 21, 23-27, 63, 77, 78).

F. Método de desinfección solar SODIS

1. ¿Qué es SODIS?

SODIS (Solar Disinfection) es un método de tratamiento de agua que depende de la energía solar para la inactivación de microorganismos patógenos, que fue diseñado para ser utilizado en pequeñas cantidades de agua a nivel domiciliario en áreas rurales y en casos de desastres. Es un método sencillo de bajo costo y ambientalmente sostenible (11, 12, 18, 20, 21, 23-27, 63, 77- 79). La desinfección solar es considerada como una alternativa sencilla, de bajo costo y aplicable a nivel casero. La tecnología es simple: se utiliza la radiación solar para inactivar y destruir patógenos presentes en el agua; esencialmente el tratamiento consiste en llenar recipientes transparentes y limpios con agua y expuestos a la radiación solar por varias horas (11, 18-22).

En varios países del mundo se han desarrollado investigaciones sobre el método de desinfección solar SODIS como India, Sri Lanka, Etiopía, Indonesia, Nicaragua, Ecuador, Honduras, México, Costa Rica, Kenia, Haití y otros; en los cuales se han registrado la inactivación de microorganismos patógenos, la reducción del número de indicadores de contaminación fecal, tales como los coliformes fecales y la reducción de casos de diarrea en niños en comunidades aisladas (12, 14, 15, 18, 21, 23-28). Tal es el caso de los estudios realizados por Conroy RM. *et al.*, en comunidades de Maasai, Kenia en uno de los cuales se reportó una disminución de casos de diarrea severa en dos semanas del 16% en niños menores de 6 años de edad luego de consumir agua desinfectada con el método SODIS (79).

En otro estudio realizado por el mismo grupo, participaron 299 niños menores de 6 años de 131 familias. De estas, 155 niños de 67 familias fueron escogidas al azar para que aplicaran el método SODIS y 144 niños de 64 familias como grupo control. Luego de un año de aplicar el método SODIS, se determinó que se reportaron 3 casos de cólera (2%) de 155 niños, del grupo que aplicó el método SODIS y 20 casos de cólera (14%) de 144 niños, del grupo control (80).

El tratamiento está dirigido a pequeñas cantidades de agua en el orden de los 2L / por persona / día o aproximadamente 10-15L / por familia / día (19); por lo que SODIS fue recomendado como un método para el mejoramiento de la calidad microbiológica del agua a nivel doméstico en el día mundial del agua 2001 (18).

2. Fundamento e historia de SODIS

La tasa de inactivación de los microorganismos aumenta con el decrecimiento de las longitudes de onda, o sea que la eficiencia de la desinfección aumenta cuando se recorre el espectro de la radiación solar hacia las ondas cortas: luz visible UV-A < UV-B < UV-C; cuanto más corta sea la longitud de onda que incide sobre los microorganismos, más eficiente es la eliminación de los mismos (12, 19, 63, 81, 82).

El método de desinfección solar SODIS se basa en el efecto sinérgico entre la temperatura (arriba de los 45°C) (14-16) y la radiación UV-A (320-400nm) (11-13, 15, 16, 18, 22), el cual depende en gran medida de las condiciones ambientales y de la calidad del agua. La radiación con mayor longitud de onda (>400nm) no elimina las bacterias con suficiente efectividad y la UV-B sólo se transmite a través del vidrio pyrex y llega a la superficie de la tierra con muy baja intensidad (11-17), por lo que la región del espectro de luz que ejerce un efecto bactericida efectivo en las aguas tratadas es la región de la UV cercana (A), que está en el rango de 320nm a 400nm; y en menor grado la región de los 400nm a 490nm (11, 12, 14, 19).

El mayor efecto letal sobre los microorganismos la presentan las longitudes de onda corta alrededor de los 260nm, que corresponde a la máxima absorción del DNA. Las bases pirimidícas se muestran especialmente sensibles y la luz UV de esta longitud de onda induce la formación de dímeros unidos por covalencia con las bases próximas del DNA. La resistencia de los microorganismos a la radiación UV está determinada en gran parte por su capacidad para reparar el daño causado por la exposición a esta, generalmente la resistencia a la radiación UV en orden ascendente es de la siguiente forma: Gram negativos < Gram positivos y levaduras < esporas bacterianas < esporas de hongos < virus (11, 16, 19, 22, 49, 81); por lo que se han publicado valores de resistencia a la radiación UV de algunos microorganismos, entre los que se citan: *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* y *Shigella flexneri* (0.04 mW.s) (49); mientras que la dosis de inactivación para los grupos de coliformes fecales y estreptococos fecales es de 30 a 45 mW.s; *Salmonella typhi* 32 mW.s; el bacteriófago Φ x-174, 30 mW.s; virus de la hepatitis A, 15 mW.s; *Giardia lamblia* 1mW.s y *Cryptosporidium parvum* de 10-25 mW.s (83).

Para la reducción de 3-log de *E. coli*, el bacteriófago f2 y rotavirus se requiere de aproximadamente 2000 KJ/m² o 555 W.h/m², que es semejante a la dosis de radiación solar en el rango de longitud de onda de 350 nm a 450 nm, que corresponde a 5 horas de luz solar de un medio día de verano. Con una temperatura del agua mayor a 50°C se requiere 140 W.h/m², lo que equivale a un tiempo de exposición aproximadamente de una hora (11, 12, 19, 22, 45, 78, 82). La inactivación de bacterias se eleva al acercarse la temperatura del agua a los 50°C, mientras que el rango de inactivación para virus es dentro de los 20°C – 50°C (19); sin embargo, Rijal GK. y Fujioka RS., reportaron que a aunque se alcancen temperaturas de 64°C-75°C todavía se detectan virus entéricos en las aguas tratadas (16).

En 1994, Wegelin M. *et al.*, compararon botellas SODIS expuestas a luz ultravioleta artificial (UV-C), radiación solar (UV-A) inoculadas con *E. coli* y botellas expuestas a la radiación solar inoculadas con mezclas de bacterias inocuas. En estos estudios Wegelin observó como después de una semana de almacenamiento las células de *E. coli* irradiadas con luz artificial, lograron alcanzar valores comparables a los iniciales. En las botellas expuestas directamente al sol las células de *E. coli* fueron totalmente inactivadas y no se obtuvieron crecimientos aún después de un tiempo mayor a dos semanas. Por último observó como después de un tiempo prolongado de almacenamiento en las botellas inoculadas con las mezclas de bacterias inocuas, los niveles

bacteriológicos alcanzaron densidades equivalentes a las iniciales; estos estudios demostraron que el objetivo del método SODIS es inactivar y matar microorganismos patógenos, pero no el de producir agua estéril (84).

Este mismo año, Quan NE realizó un estudio sobre el uso de la radiación solar para la desinfección del agua contaminada con *V. cholerae*, comparando el uso de un baño plástico, envases plásticos de doble litro y envases de vidrio de boca ancha con tapa de rosca; en este estudio se obtuvieron reducciones más elevadas en los envases de vidrio, seguido del envase de doble litro y por último el baño plástico; además se evaluó una caja absorbidora de calor, dentro de la cual se colocaron botellas de vidrio color ámbar, en las cuales se observó una inactivación del 100% de los vibrios (9).

En 1997 Solarte Y. *et al.*, realizaron un estudio inoculando *Vibrio cholerae* en agua, en botellas de vidrio, botellas de plástico y bolsas plásticas, logrando la inactivación del 100% de vibrios, en los tres tipos de recipientes utilizados. Se logró la inactivación al alcanzar gradualmente los 45°C y seis horas de exposición al sol; también determinó que a mayor temperatura y menor turbiedad se necesita menos intensidad de radiación UV-A; por último logró una muy buena correlación entre la inactivación de coliformes termorresistentes y *Vibrio cholerae* (26, 85).

En 1998, McGuilan KG. *et al.*, observaron que las bacterias permanecen inactivas si las aguas tratadas alcanzan temperaturas mayores a los 45°C e intensidades de radiación mayores a los 70 mW cm⁻² por períodos mayores a las 7 horas (14). En 1999 se desarrolló un estudio a nivel de laboratorio donde se determinó que utilizando concentradores solares se redujo hasta 10⁵ coliformes en NMP/100 ml, 10⁶ unidades formadoras de placa viral y 10³ UFC de *Vibrio cholerae* con niveles de radiación UV promedio de 700 W/m² durante cuatro horas de exposición. Los niveles de inactivación de *V. cholerae* son similares a los del grupo de coliformes a temperaturas mayores a los 50°C y aunque no se sobrepasara esta temperatura la inactivación de *V. cholerae* es mucho mayor que la de coliformes (12, 18, 22).

En 2002, Cortez JE. *et al.*, determinaron que la exposición de las botellas a cantidades mayores de 3000 W-h/m² de radiación solar evita el recrecimiento de microorganismos durante cinco días de almacenamiento del agua tratada en las botellas de plástico. Del grupo de heterótrofos mesófilos *Pseudomonas* sp., *Moraxella* sp., *Bordetella* sp., *Citrobacter freundii* fueron los géneros que se aislaron durante el almacenamiento luego del tratamiento SODIS y *S. arizonae* y *S. typhi* se recuperaron después de 48 horas de almacenamiento, después de ser expuestas a radiación solar por 3- 4 horas (22).

En 2003, Caslake LF *et al.*, desarrollaron un estudio de aplicación del método SODIS donde registraron que en 30 minutos de exposición a la radiación solar se logra la reducción de 4 log₁₀ (aproximadamente el 99.99%) de bacterias en aguas altamente contaminadas (65). También en 2003, en Colombia se desarrolló una investigación sobre el efecto del método SODIS sobre quistes y ovoquistes de *G. lamblia* y *C. parvum*,

utilizando aguas naturales contaminadas, encontrando que el método presenta variaciones en su incidencia sobre estos microorganismos que van desde el 36% hasta el 68% de inactivación (86).

En 2006, Berney M., determinó la eficacia del método de desinfección solar utilizando cepas de patógenos entéricos. En este estudio se estableció que la resistencia a la foto inactivación a 37°C es en orden decreciente mayor en *S. typhimurium* > *E. coli* > *S. flexneri* > *V. cholerae*. También se determinó que las cepas de *S. typhimurium* > *E. coli* > *S. flexneri* son más susceptibles a la foto inactivación con luz solar arriba de los 45°C, mientras que *V. cholerae* desde los 40°C (87).

Heaselgrave W., en 2006 realizó un estudio simulando las condiciones de luz solar a nivel de laboratorio para determinar su efecto sobre poliovirus y quistes de *Acanthamoeba polyphaga* en agua. Se logró establecer que con una radiación mayor a los 850W.m² después de 6 horas y arriba de los 25°C el poliovirus es inactivado. *Acanthamoeba polyphaga* es inactivada a 50°C por 6 horas y a 55°C por 4 horas (88).

En 2008 Boyle M *et al.*, pusieron a prueba el método SODIS en España y Bolivia utilizando cepas de *Campylobacter jejuni*, *Yersinia enterocolitica*, *Escherichia coli* enteropatogénica, *Staphylococcus epidermis* y esporas de *Bacillus subtilis*. En su investigación obtuvieron resultados positivos al determinar que si existe una inactivación de las células vegetativas, aunque en el caso de las endosporas tuvieron que exponer las botellas al sol para lograr su inactivación completa (89).

Los primeros estudios fueron realizados por el profesor Aftim Acra de la Universidad Americana de Beirut, Líbano en los años 70. Estos revelaron que *E. coli* es ligeramente más resistente a la radiación solar que otras bacterias como *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella typhi*, *Salmonella enteritidis* y *Salmonella flexneri*; por lo que *E. coli* se tomó como un indicador de los efectos de la luz solar sobre la familia de enterobacterias (11-13, 19).

En 1987, Acra *et al.*, utilizaron una unidad de desinfección solar de flujo continuo y tanques de volúmenes desde 5 hasta 18 litros, para realizar experimentos con un flujo constante y tiempos de exposición entre 8 a 66 minutos. En estos ensayos se comprobó que *Streptococcus faecalis* es ligeramente más resistente que *E. coli* y los coliformes a la radiación y requiere una radiación UV de aproximadamente 27 W.h/m² para lograr una reducción de 3-log. (12, 19, 90).

Además, observó que una alta concentración de bacterias muestra una baja sensibilidad a la radiación UV, comparada con aguas de menos densidad bacteriológica. También observó que la concentración de *E. coli* debe de ser de 2 – 6000 UFC/ml, en contraste con las 10⁶ – 10⁸ UFC/ml utilizadas normalmente en los ensayos con unidades de bajo volumen (19, 90).

Otro aspecto resaltado por Acra, es el hecho de que existe diferencia al utilizar una cepa pura de *E. coli* y aguas residuales, por lo que recomienda el uso de aguas residuales para los ensayos de investigación. Por

último describe que no se observó en sus ensayos, el crecimiento de fitoplancton en el interior de los reactores de ensayo, debido a la pérdida de gases disueltos y la ausencia de suficiente cantidad de nutrientes (19).

Motivados por los estudios de Acra, la asociación de los programas universitarios de las Naciones Unidas Integrated rural energy systems association (INRESA), iniciaron en 1985 proyectos de investigación y divulgación de la tecnología de desinfección solar. En 1988, en el Brace research institute (BRI), con sede en la McGill University en Montreal, Canadá, se presentaron los resultados obtenidos por cinco institutos de investigación localizados en el Perú, Colombia, Nigeria, Egipto y Sri Lanka (11, 12, 19, 23, 90).

Los hallazgos principales de INRESA fueron:

- Los resultados de Acra fueron confirmados cualitativamente por pruebas de campo en diferentes partes del mundo, en las cuales la radiación solar ejerció un efecto bactericida sobre las muestras de agua contaminada.
- La desinfección solar puede ser aplicada efectivamente si la intensidad de la radiación solar es por lo menos de 500 W/m^2 durante un período de 5 horas y el grado de contaminación del agua no excede a las 1000 UFC/100 ml de coliformes fecales.
- La variación de la temperatura entre los 12°C y 40°C no parece jugar un papel importante en la inactivación de las bacterias, o sea que no observaron la sinergia entre la radiación solar y la temperatura (11, 12, 19).

En Guatemala, en el año 2002, la Catholic Relief Services (CRS), Cáritas Diocesana Verapaz y Fundemi Talita Kumi, aplicaron el método de desinfección solar SODIS en las comunidades de Cubulco, Salamá y Granados de Baja Verapaz; y Chisec de Alta Verapaz, ya que en estas comunidades el 30% de la población no cuenta con suministro de agua potable y más del 90% consume agua contaminada microbiológicamente. Luego de dos años de aplicar el método de desinfección solar SODIS (del 2002 al 2004), el número de casos de enfermedad diarreica se redujo en un 75% en los consumidores de agua tratada con SODIS (91).

En el 2003, la catholic relief services (CRS), la escuela regional de ingeniería sanitaria (ERIS) y la fundación SODIS, iniciaron proyectos piloto para la introducción del método SODIS en 4 comunidades del altiplano y boca costa del departamento de San Marcos, involucrando a 200 familias. En estos proyectos se realizó únicamente la capacitación de promotores y miembros de cada familia; y la aplicación del método. No se realizaron análisis de la eficiencia del método (29).

Mendoza, MG. realizó un estudio sobre la eficiencia del método de desinfección solar de agua, exponiendo varias bolsas plásticas con agua inoculadas con una cepa de *Escherichia coli*, directamente al sol y bajo sombra a distintos tiempos, fechas y horarios en distintas áreas del departamento de Chimaltenango; en

este estudio se determinó que existe una disminución significativa de *E. coli* de >2400 NMP/100ml a <3NMP/100ml en 90 min, 105 min y 75 min entre las 10:00 y 14:00 horas (92).

3. Factores que intervienen en SODIS

a. Radiación solar

La radiación solar en la tierra se compone de varios tipos de luz: UV-A (315-400nm), UV-B (280–315 nm), UV-C (100-280 nm), luz visible y luz IR. No toda la radiación que alcanza la capa atmosférica llega a la superficie de la tierra, ya que la radiación UV-B y UV-C que están en el rango de 200 a 320nm, es absorbida por la capa de ozono y solamente una fracción de la radiación UV-A llega hasta la superficie de la tierra, además la intensidad de la radiación solar sobre la superficie de la tierra varía en función de la inclinación del planeta en relación a su eje, latitud, altitud, estación y hora del día (11-13, 42, 81).

Estos factores (principalmente la latitud) determinan el clima en los diferentes ambientes de la tierra, ya que la variación estacional de la intensidad de la radiación solar disminuye en relación a la cercanía de cada región al Ecuador (42, 93-96). SODIS utiliza principalmente dos componentes de la luz solar: la luz ultravioleta UV-A para la irradiación de microorganismos y la luz infrarroja IR para elevar la temperatura del agua, lográndose un efecto sinérgico que eficientiza el proceso. La radiación UV-A afecta la respiración celular, el transporte a través de la membrana, la síntesis de DNA y de proteínas, además de provocar la producción de compuestos tóxicos derivados del oxígeno disuelto llamados ROS o Especies reactivas al oxígeno como el ión superóxido (O_2^-) el ión peróxido (H_2O_2), el ión hidroxilo (OH^-) y otros (11-14, 20, 22, 78, 82, 85, 97, 98).

Al igual que la radiación UV, la luz visible de fuerte intensidad es capaz de inactivar a las bacterias debido a las riboflavinas, porfirinas y citocromos que absorben la energía de los cuantos y se excitan durante $10^6 - 10^8$ segundos, tras lo cual reemiten la energía a otras moléculas originando fotooxidaciones en residuos His y Trp de las proteínas y en las bases de los ácidos nucleicos, generando oxígeno singlete y otros radicales libres que son muy reactivos y oxidantes (22, 83, 97, 98).

La otra fracción del espectro de luz que incide positivamente en la eficiencia del método SODIS es la región de la luz Infra Roja (> 700 nm). La radiación IR (Infra Roja) es la responsable del calentamiento del agua en la aplicación de SODIS (11, 12). Smith RJ. *et al.*, demostraron los efectos de la radiación UV-A y la luz visible sobre la reducción de la infectividad de *Salmonella typhimurium*, luego de exponer por varias horas a la luz solar, aguas contaminadas con este microorganismo (25). Kehoe SC. *et al.*, aplicaron el método SODIS a aguas contaminadas con *Shigella dysenteriae* tipo I, el cual fue efectivo para la inactivación de este patógeno (88). La resistencia térmica de algunos microorganismos patógenos en relación al tiempo de exposición se muestra en el Anexo No. 4.

Sin embargo, el ADN posee mecanismos prerreplicativos y posreplicativos que le permiten reducir los daños causados por la radiación UV e IR (83, 98). Aunque estos mecanismos pueden ser activados por los microorganismos después de la aplicación de SODIS, en 2006, Berney M; estudió como la radiación solar afecta las funciones celulares de *Escherichia coli* durante la desinfección solar utilizando el método SODIS, estableciendo que las células expuestas a la radiación UV-A en cantidades mayores a 1500KJ.m^2 (530W.m^2) por más de 6 horas ya no son capaces de reparar los daños causados a las funciones celulares y recuperarse (89).

En aguas superficiales los microorganismos propios del agua están adaptados a recibir grandes cantidades de radiación solar y a los cambios de temperaturas, por que luego de varios días de almacenamiento se ha observado que microorganismos inocuos (no patógenos) como bacterias y algas crecen en las botellas expuestas a la luz solar (11, 12, 22).

b. Ubicación geográfica

La radiación solar no se distribuye uniformemente sobre la superficie terrestre. Se ha dividido la distribución de la radiación solar sobre la tierra en cuatro cinturones: el primero es el cinturón más favorable; estas zonas geográficas son las más favorables para la aplicación de SODIS y se encuentran entre los 15° y 35° latitud Norte y Sur. Estas regiones semiáridas se caracterizan por recibir mayor cantidad de radiación solar, de la cual más del 90% llega como radiación directa debido a la escasa cantidad de nubes y lluvia (menos de 250 mm de precipitación pluvial y más de 3000 horas de luz solar anualmente) (11, 12, 81, 92).

En segundo lugar, se encuentra el cinturón moderadamente favorable; estas regiones se localizan entre la línea del Ecuador y 15° de latitud Norte y Sur, que se caracterizan por su alta humedad y frecuente nubosidad, por lo que la proporción de radiación dispersa es alta (aproximadamente 2500 horas de luz solar anualmente). Luego siguen el cinturón menos favorable y el cinturón muy poco favorable (11, 12, 81, 92).

Los países en los cuales es factible aplicar el método de desinfección solar se encuentran ubicados entre las latitudes 35° N y 35° S. La intensidad de la radiación solar varía en función de la hora del día, ubicación geográfica, estación y clima (11, 12, 96). Guatemala se ubica en el segundo cinturón y la región de Huehuetenango es la que recibe mayor radiación solar en los meses de marzo y abril (9, 92).

c. Variaciones climáticas y estacionales

Las variaciones estacionales son dependientes de la latitud y la principal causa del clima de cada región. Las regiones cerca de la línea Ecuatorial experimentan un menor número de variaciones en la intensidad de la luz durante el año que las regiones en los dos hemisferios. Estas variaciones son importantes en la aplicación del método SODIS, ya que depende de la intensidad de radiación solar (mínimo 500W/m^2 por 6 horas) en el

lugar de aplicación, si el método SODIS es eficaz o no (11, 12, 23). La nubosidad, reduce en un tercio la intensidad de radiación solar registrada en un día despejado (11, 12).

d. Botellas de tereftalato de polietileno (PET)

En estudios de comparación entre botellas plásticas (PET), bolsas plásticas y botellas de vidrio se comprobó que en la bolsa plástica se obtienen mejores resultados, sin embargo su manipulación y fragilidad obligan a utilizar las botellas de PET (78).

Las ventajas de utilizar botellas plásticas de PET son:

- Bajo peso para su manipulación.
- Permite un fácil llenado, transporte y vaciado del agua.
- Pueden utilizarse directamente en la mesa sin necesidad de otro recipiente.
- Transparente
- Neutro al gusto
- Poca profundidad. Este aspecto es importante ya que a mayor profundidad la efectividad de la radiación UV disminuye.
- Químicamente estable, pues los aditivos que sirven para proteger al envase de la degradación solar, no tienen influencia en la calidad del agua, ya que no se producen fotoproductos en el interior de la botella.
- El PET presenta una buena transmitancia frente a la radiación UV-A.
- Bajo costo y casi universalmente disponibles.
- Robustos
- Reutilizables y fáciles de lavar (11, 12, 17, 20, 23, 85, 102, 103).
- Las botellas no retornables permiten un mayor porcentaje de radiación UV-A traspase las paredes de la botella en comparación con las botellas retornables (93).

Las desventajas de utilizar botellas plásticas de PET son:

- Se necesitan varias botellas para obtener el volumen de agua necesario para el consumo de una familia completa.
- Resistencia limitada a la temperatura, ya que se deforma arriba de los 65°C.
- Técnicamente las botellas no son los recipientes más eficientes ya que presentan un área de exposición pequeña y una profundidad para el agua relativamente alta (6-10cm), en consecuencia la relación área de exposición/volumen de agua es bastante baja, lo que significa que el agua no se calentará lo suficiente y la intensidad de radiación UV-A se verá muy reducida en la parte baja de la botella.

- Se raya fácilmente.
- Defectos por envejecimiento como ralladuras mecánicas, provoca una reducción en la transmitancia de la luz UV, en consecuencia se obtiene una menor eficacia en la inactivación de los microorganismos.
- La constante exposición a la radiación UV, provoca la formación de productos fotoquímicos. Estas reacciones dan como resultado cambios en las propiedades ópticas del plástico, reduciendo así la transmisión UV en el rango espectral de 320nm a 400nm (11, 12, 17, 23, 85, 100, 102).

Para climas cálidos, pueden utilizarse botellas pintadas longitudinalmente a la mitad de color negro, permitiendo esto que la temperatura se eleve más rápidamente. En climas fríos, se recomienda que las botellas sean transparentes completamente para optimizar el efecto de la radiación UV (11, 93).

e. Turbiedad del agua

Una turbiedad elevada reduce significativamente la penetración de la luz en las aguas y por consecuencia reduce la eficiencia de la inactivación de microorganismos con el método SODIS, debido a que el agua desvía y dispersa la radiación en todas direcciones, por lo que se recomienda que la turbiedad del agua a desinfectar sea menor a 30 UNT (Unidades Nefelométricas de Turbiedad) (11, 12, 14, 20, 23, 78, 85, 104, 105). Además las turbiedades altas causan que la intensidad de la radiación UV-A se reduzca en relación a la profundidad del agua. Este efecto fue observado por Joyce TM. *et al*; quienes observaron que arriba de las 200 UNT la radiación se dispersa en apenas 1cm de profundidad en las botellas de PET (20). No ocurre lo mismo con la temperatura, ya que se alcanza el mismo nivel de temperatura en aguas turbias y en aguas claras a profundidades iguales (11, 14, 20, 78, 105).

Se describe un método sencillo para determinar si el agua necesita ser filtrada antes de someterla al método SODIS, el cual consiste en poner la botella llena por encima de una figura (logotipo SODIS), luego se mira a través de la botella desde arriba hacia abajo, bajo sombra, sobre una mesa para evitar interferencia de luz. Si se pueden leer las letras a través del agua, la turbiedad es menor a 30 UNT y si se pueden ver los rayos del sol del logotipo, la turbiedad es menor a 20 UNT (11, 12, 63, 104). Si la turbiedad del agua es mayor a 30 UNT los sólidos pueden ser separados por decantación o filtración, por lo que el método puede ser combinado con el proceso de floculación-sedimentación, utilizando sulfato de aluminio o algún coagulante natural (11, 14, 63, 104). A menor densidad de microorganismos, la tasa de inactivación es mayor. Se ha propuesto de que esto se debe a que es más fácil la penetración e inactivación de las bacterias cuando estas se encuentran dispersas y en forma individual; no así cuando las densidades son altas, en donde las células pueden estar aglomeradas, protegiéndose de la radiación UV-A (85).

f. Oxígeno disuelto

La radiación ultravioleta UV-A provoca la formación de radicales libres y peróxido de hidrógeno a partir del oxígeno disuelto en el agua; estas moléculas altamente reactivas, actúan sobre los microorganismos inactivándolos por reacciones de foto-oxidación. En aguas altamente oxigenadas permiten que el método SODIS sea más efectivo. Sin embargo estas formas temporales producidas por la acción del sol sobre el oxígeno no tienen efecto residual significativo, luego de ser retirada la botella de la luz del sol (11, 12, 24, 106-108).

En 1997 Reed RH realizó varios estudios donde determinó como en condiciones aeróbicas la reducción de coliformes fecales en aguas contaminadas con aguas negras, presentan una disminución de bacterias en un factor superior a 1000, en tres horas de exposición al sol, mientras que la reducción en condiciones anaeróbicas en el mismo tiempo fue de aproximadamente en un factor de 10 (106, 108). En otro estudio Reed RH., determinó que para el método de desinfección solar, se necesitan condiciones aeróbicas para la reducción efectiva de los indicadores de contaminación fecal como *E. coli* y *Enterococcus faecalis* (109). A nivel de laboratorio también se observó que los coliformes fecales, *E. coli*, *Enterococcus* sp. y *Streptococcus* sp., son inactivados más eficientemente en condiciones aeróbicas que en condiciones anaeróbicas (11, 12).

De forma sencilla, se puede aumentar la aireación y el contenido de oxígeno en el agua, agitando el agua cruda vigorosamente antes de llenar la botella o llenar la botella hasta la mitad, luego se agitar fuertemente y por último se llena hasta el volumen aconsejado antes de exponerla al sol. Este proceso se recomienda especialmente para aguas estancadas como agua de lagos, pozos, tanques, lagunas y otros (11, 12, 24, 106).

g. Temperatura del agua

El crecimiento microbiológico puede ocurrir en un intervalo de temperaturas desde los -8°C hasta los 100°C . Cada microorganismo crece dentro de un rango de temperaturas mínima, óptima y máxima, conocidas como temperaturas cardinales. A medida que la temperatura sobrepasa el límite máximo de crecimiento, las proteínas se desnaturalizan y la membrana plasmática se destruye. A mayor temperatura, mayor es la velocidad de destrucción de los microorganismos. Se ha establecido que la muerte térmica es un proceso de primer orden, o sea que a una temperatura letal, la rapidez de la muerte depende del número de células viables presentes (49).

Generalmente las bacterias Gram positivas son más termorresistentes que los Gram negativo. Las esporas bacterianas son más resistentes que las células vegetativas. Se han reportado valores de termorresistencia bacteriológica (D_t : tiempo necesario a una temperatura dada, para que la población superviviente se reduzca en 1 ciclo logarítmico, esto es el 90%) para algunas especies de bacterias, tales como, *Salmonella* sp. (D_{65} 0.02-0.25 min.); *Staphylococcus aureus* (D_{65} 0.2-2.0 min.); *Escherichia coli* (D_{65} 0.1 min.); *Listeria*

monocytogenes (D_{60} 5.0-8.3 min.) y otros (49). A mayor temperatura, menor tiempo de exposición y menor dosis de radiación necesaria para la reducción hasta un 99.9% de microorganismos tales como bacterias, virus, quistes de amebas y huevos de helmintos (12, 14, 20, 22, 82).

Sommer B. *et al*, determinaron que el método SODIS es efectivo para la inactivación de coliformes fecales y *V. cholerae*, cuando el agua alcanza aproximadamente 50°C combinado con la radiación UV-A (78). Al aumentar la temperatura del agua, se producen cambios importantes como el aumento en la tasa de reacciones químicas y bioquímicas, la solubilidad de los gases disminuye y la tasa metabólica de los microorganismos aumenta considerablemente, causando la destrucción de la integridad celular (85). Si se alcanza una temperatura mínima de 50°C, la exposición a la radiación solar de una hora es suficiente (11-13, 78).

4. Criterios microbiológicos aplicados a SODIS

Las concentraciones de coliformes fecales utilizadas a nivel de laboratorio en los estudios realizados, han sido concentraciones entre los 1×10^4 NMP/100ml (número más probable), hasta $>1 \times 10^6$ NMP/100ml, las cuales son mucho mayores que las encontradas en ríos y lagos contaminados (110). Ya que SODIS es un método aplicado a nivel casero, los criterios microbiológicos aplicados para este método no son muy estrictos, debido a que el riesgo relacionado con una contaminación se incrementa con el número de personas servidas de una misma fuente; esto significa que a mayor número de personas por sistema o fuente de agua, más exigentes son los criterios microbiológicos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció criterios de aceptación de las fuentes de aguas utilizadas para consumo humano en relación a la cantidad de coliformes fecales y *E. coli* por cada 100ml, determinando que una fuente de agua con un conteo de 0 coliformes cumple con las normas establecidas por la OMS, de 1-10 se clasifica como de bajo riesgo, de 10-100 de riesgo intermedio, de 100-1000 de alto riesgo y mayor a 1000 de muy alto riesgo (11). Además la OMS estableció que el indicador de contaminación fecal debe ser *E. coli*, no debiéndose detectar esta bacteria en el agua destinada para consumo humano (32-35).

5. Factores de aceptación y rechazo de SODIS por los usuarios

Se han desarrollado proyectos demostrativos de SODIS en varios países del mundo para evaluar la aceptación sociocultural del método. En estos estudios se logró establecer las principales razones por las cuales la gente acepta el método SODIS, entre las cuales se mencionan:

- El método es sencillo y práctico.
- El agua es limpia y buena para tomar.
- Permite ahorro de tiempo para emplearlo en otras actividades.
- Sustituye actividades como el hervir el agua, juntar y acarrear leña y encender fogatas.

- Permite el ahorro de leña.
- Las personas elevan su nivel social dentro de su comunidad, al adoptar este tipo de método casero de desinfección de agua.
- Provee a las personas una mejor calidad de vida (23, 111).

Entre las razones por las cuales la gente no confía y/o no utilizaría el método se mencionan:

- No creen que las bacterias puedan ser destruidas solo por la exposición al sol.
- El tiempo de espera es muy largo.
- El agua sabe y huele a plástico.
- Por falta de materiales (111).

6. Factores que reducen la eficiencia de SODIS

Los factores que reducen la eficiencia del método SODIS en su aplicación son los siguientes:

- Agua turbia (11, 23, 112).
- Botellas con baja transmitancia UV-A (11, 23, 112).
- Baja temperatura del medio ambiente (11, 23, 112).
- Cielo cubierto o nublado (11, 23, 78, 112).
- Botellas colocadas verticalmente y no horizontalmente (11, 23, 112).
- Tiempo de exposición a la radiación solar menor al establecido por el método, permitiendo la reparación genética de los microorganismos (11, 23, 102, 112).

7. Factores que elevan la eficiencia de SODIS

Para aumentar la eficiencia del procedimiento de desinfección solar de agua SODIS, se recomienda seguir las siguientes indicaciones (11, 113).

- Utilizar botellas plásticas de 1-2 litros, preferiblemente de PET.
- Medir cuando sea posible, la transmitancia del material con un espectrofotómetro.
- Verificar el buen estado de la botella y la tapadera.
- Limpiar cuidadosamente el exterior e interior de la botella.
- Pintar longitudinalmente la mitad de la botella de color negro.
- Utilizar agua lo más clara posible.
- Cuando sea necesario, dejar reposar el agua para remover los sólidos sedimentables antes del tratamiento.
- Utilizar agua aireada.

- Esperar un tiempo mínimo de exposición al sol de una hora, después de que ha alcanzado la temperatura de 50°C.
- En tiempo de lluvia, utilizar otro método alternativo como hervir el agua o recolectar agua de lluvia de superficies limpias.
- Reemplazar las botellas viejas o dañadas (11, 112, 113).
- Orientar las botellas de tal forma de que, la mayor cantidad de radiación incida sobre ellas (22).
- No colocar botellas sobre botellas o pasar el agua a otros recipientes (22).
- En días nublados, las botellas deben de ser expuestas durante dos días consecutivos (10, 84).

Entre los errores más comunes observados, en la ejecución del proceso SODIS se mencionan casos en los cuales las botellas son expuestas al sol en la mañana y luego de unas horas, la sombra de árboles o de las casas no permite que el tiempo de exposición a la radiación sea el adecuado. También se ha observado que mucha gente pone sus botellas sobre una silla y luego de un tiempo, el respaldo de la silla proyecta su sombra sobre la botella o las botellas giran su posición al no ser aseguradas; en otros casos, las personas ponen las botellas con la parte negra hacia el sol en lugar de la parte transparente (110).

Estudios han demostrado como la eficiencia del método SODIS es mayor cuando las botellas son colocadas sobre láminas, techos de tejas o rocas negras, materiales que permiten elevar la temperatura del agua con mayor rapidez, en comparación con botellas colocadas sobre cemento o sillas donde solamente se lograba que el 50% de las botellas tratadas no presentaran crecimiento de coliformes fecales (18, 76, 110, 112).

En 2008 Fisher, MB. determinó que utilizando aditivos como el jugo de limón, el jugo de lima, el agua oxigenada y soluciones acuosas de cobre con ascorbato, la eficiencia del método SODIS se eleva tanto en días soleados como nublados incrementando la foto inactivación de *E. coli* (114).

8. Ventajas y desventajas de la utilización de SODIS

a. Ventajas

- SODIS mejora la calidad microbiológica del agua para consumo humano (11, 12, 18, 75).
- SODIS reduce el porcentaje de casos de diarrea causadas por microorganismos patógenos (12, 18, 75).
- SODIS mejora la calidad de vida y salud de la familia (11, 12, 75).
- SODIS sirve como un punto de entrada para la educación en salud e higiene (11, 12).
- SODIS proporciona a los usuarios individuales un método simple de aplicar en su hogar bajo su propio control y responsabilidad (11, 12).
- SODIS no requiere de infraestructura costosa, por lo que es fácilmente replicable (11, 12, 23, 75).
- SODIS se basa en recursos naturales y de energía renovable (11, 12).

- SODIS ayuda a reducir la carga de trabajo de mujeres y niños que se dedican a la recolección de leña (11, 12).
- El costo del proceso está dividido en costos de inversión y costos de operación y mantenimiento. La inversión en una botella varía de país en país, que en general es menor a los 0.5 US\$ por botella. Se ha calculado que el costo anual en una familia de 5 personas es de 3.00 US\$. Los costos de operación y mantenimiento son muchos menores ya que la energía solar es totalmente gratuita (11, 75, 76, 115).

b. Desventajas

El método de desinfección solar SODIS esta diseñado para resolver el problema de calidad del agua en aquellos poblados necesitados de agua segura, sin embargo existen limitaciones del método (11, 19).

- Condiciones climáticas.
- Posición geográfica.
- Variaciones diarias y anuales.

Algunas de las limitaciones de SODIS son:

- No es útil para tratar grandes cantidades de agua.
- Requiere de agua relativamente clara, o sea con una turbiedad menor a 30 UNT.
- Se necesita de la radiación solar, por un tiempo mínimo de 5 horas en un día despejado o 50% nublados y de 2 días consecutivos en días totalmente nublados.
- No cambia la calidad química del agua.
- No altera ni el olor ni el sabor del agua.
- No se produce agua estéril.
- Las condiciones de aplicación en el campo difieren mucho de las condiciones en el laboratorio.
- La mala manipulación del agua tratada (11, 12, 77, 84, 110).

G. Cuantificación de coliformes totales y *Escherichia coli* por el método de número más probable Colilert®, basado en la tecnología del sustrato enzimático definido de IDEXX®

El sistema Colilert® utiliza el principio del sustrato definido para la cuantificación del grupo de coliformes totales y *Escherichia coli* (52).

Los sustratos ONPG(o-nitrofenil- β -D-galactopiranosido) y MUG (4-metilumbelliferil- β -D-glucuronidasa) son hidrolizados por las enzimas del grupo coliforme y por *Escherichia coli*. Los coliformes totales comprenden el grupo que posee la enzima β -D galactosidasa, que separa el sustrato cromogénico (ONPG),

produciendo la liberación de un cromógeno amarillo. *Escherichia coli* utiliza la enzima β -glucuronidasa que escinde un sustrato fluorogénico (MUG), produciendo la liberación del fluorógeno (4-metillumbelliferone) el cual es fluorescente bajo la luz ultravioleta a 366nm. La prueba se puede utilizar ya sea en un formato de tubos múltiples, pozos múltiples, o de presencia-ausencia en muestras de 100 ml (50, 52). En el Anexo No. 5 se muestra forma como se realiza el análisis del grupo coliforme en aguas, utilizando el método de Colilert® de IDEXX.

El método muestra varias ventajas en relación a los métodos de fermentación de tubos múltiples y filtración por membrana como por ejemplo, que el número de microorganismos heterótrofos no influye sobre la cuantificación de los coliformes y *E. coli*; otra ventaja es de que no existen los falsos positivos por reacciones tales como la fermentación y formación de gas, como en el caso de *Aeromonas* spp. (52, 116).

III. JUSTIFICACIÓN

Una gran parte de la población guatemalteca no tiene acceso al agua potable, por lo que se ven obligados a utilizar recursos naturales que están a su alcance, como aguas superficiales y aguas subterráneas sin ningún tratamiento previo a su consumo. En el 2000 la Organización Mundial de la Salud, reportó que el 38.29% de la población de Guatemala no tiene cobertura de agua potable, correspondiente a 491,000 personas del área urbana y 3,755,000 del área rural. Los costos de los métodos de tratamiento de agua para su potabilización son elevados, siendo inalcanzables para la mayoría de las personas en las áreas marginales (60, 71).

Diversos métodos alternativos a los procesos tradicionales de desinfección del agua, son aplicados en las áreas rurales de bajos recursos, entre los que se encuentra el método SODIS. Este método utiliza la acción sinérgica de la radiación ultravioleta e infrarroja emitidas por el sol, que al incidir directamente sobre el agua provocan la muerte de los microorganismos patógenos. SODIS es un método de bajo costo, de fácil aplicación e implementación; y que está siendo utilizado en países recientemente industrializados de Asia, África y América Latina como una alternativa viable para las poblaciones en las que no se cuenta con el recurso de sistemas de distribución de agua potable y los ingresos económicos son tan bajos que no pueden costear otros métodos como la cloración o hervir el agua (117-119).

No obstante en Guatemala SODIS ha sido aplicado de forma planificada en regiones de Baja Verapaz, Huehuetenango y San Marcos, y como un método emergente en los recientes desastres naturales que han afectado el territorio nacional, pero sin haber realizado ningún estudio previo para determinar su eficiencia en la inactivación de microorganismos indicadores de contaminación fecal y patógenos en aguas contaminadas, tomando en cuenta las diferentes zonas climáticas y características geográficas y topográficas del país. Guatemala no cuenta con datos reportados de la eficacia de SODIS en las regiones en las cuales se ha utilizado, lo que significa que no se conoce si el método al ser aplicado en estas regiones es eficiente o no, inhibiendo el crecimiento de los microorganismos indicadores de contaminación fecal y patógenos.

San Juan Sacatepéquez es un municipio del departamento de Guatemala cercano a la ciudad capital, de fácil acceso y que carece en muchas de sus comunidades de sistemas de distribución de agua potable. En un estudio realizado por la Organización Panamericana de la Salud, en 2002 se determinó que los casos de muerte infantil debido a enfermedades intestinales es de 47.7 por cada 1000 habitantes (30), condiciones que son similares en varias regiones del país. Se eligió este municipio por su cercanía a la ciudad capital, los antecedentes de mortalidad infantil, falta de acceso al agua segura, datos de varios estudios de saneamiento ambiental y de calidad de agua que se han realizado en la región, que demuestran la mala calidad sanitaria de las fuentes de aguas. Al determinar si el método SODIS es efectivo en San Juan Sacatepéquez, región que pertenece a la zona climática de la Meseta y Altiplanos, se podrán establecer con evidencias científicas que es un método efectivo y recomendable para su implementación en otras regiones con características geográficas y climáticas similares.

IV. OBJETIVOS

A. General

Aplicar el método de desinfección solar SODIS en fuentes de aguas naturales que presentan diferentes niveles de contaminación y que son utilizadas para el consumo humano en comunidades de San Juan Sacatepéquez, del departamento de Guatemala.

B. Específicos

1. Caracterizar microbiológicamente las fuentes de aguas naturales seleccionadas para la aplicación del método de desinfección solar SODIS.
2. Determinar la concentración de oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura, pH y turbiedad en los puntos de consumo de agua seleccionados.
3. Cuantificar la carga de bacterias heterotróficas, coliformes totales y *Escherichia coli* en las fuentes de aguas naturales seleccionadas.
4. Aplicar el método de desinfección solar SODIS en las fuentes de aguas naturales seleccionadas de forma aleatoria en el municipio de San Juan Sacatepéquez.
5. Efectuar el análisis microbiológico de las aguas tratadas con el método de desinfección solar SODIS.
6. Evaluar la eficiencia del método de desinfección solar SODIS en las fuentes de aguas naturales caracterizadas de San Juan Sacatepéquez.

V. HIPÓTESIS

El método de desinfección solar SODIS puede utilizarse como un método alternativo de desinfección de agua contaminada en fuentes naturales del municipio de San Juan Sacatepéquez, Guatemala.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Universo de trabajo

Fuentes de aguas naturales de las comunidades del municipio de San Juan Sacatepéquez del departamento de Guatemala.

1. Muestra

Por conveniencia se escogieron tres comunidades del municipio de San Juan Sacatepéquez y de cada comunidad se eligieron tres puntos utilizados por las personas del lugar para su consumo.

B. Recursos

1. Humanos

- Bachiller Rafael Augusto López González (Tesisista)
- Licenciada María Beatriz López (Asesora)
- Licenciada Ana Rodas de García (Colaboradora)
- Licenciada Maricruz Álvarez (Colaboradora)
- Licenciada Alba Marina Valdés de García, MSc. (Revisora)
- Doctora Patricia Saravia (Revisora)

2. Institucionales

Laboratorio de microbiología del agua, unidad de entrenamiento e investigación en entomología médica (MERTU/G-CDC), Universidad del Valle de Guatemala.

Laboratorio de análisis fisicoquímicos y microbiológicos LAFYM, del programa de experiencias docentes con la comunidad EDC, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Laboratorio biológico industrial LABIND.

Laboratorio de análisis microbiológicos y fisicoquímicos de aguas y alimentos VERTICAL.

3. Físicos

a. Materiales

- Agitadores magnéticos de 2 pulgadas
- Bandejas plásticas de 97 pozos para Colilert® (IDEXX)
- Botellas desechables de tereftalato de polietileno (PET) de 2L

- Encendedor
- Marcador indeleble
- Recipientes plásticos de 1.0L
- Recipientes plásticos estériles con tiosulfato de sodio (IDEXX)
- Tabla de número mas probable para bandejas de 97 pozos (IDEXX)

b. Cristalería

- Botellas de vidrio esterilizables de 500 ml (BOECO)
- Pipetas serológicas estériles de 1.0 ml subdividas en 0.01 ml (PYREX)
- Recipientes estériles para dilución con 99 ml de buffer de fosfatos (capacidad máxima 150 ml)
- Recipientes de vidrio estériles con cubierta de papel kraft, amarrado con cáñamo y con tiosulfato de sodio al 0.1 % (capacidad máxima 150 ml)
- Cajas petrí desechables de poliestireno (área de 57 cm²)

c. Reactivos

- Agua desmineralizada
- Etanol al 70%
- Buffer de fosfatos de butterfield's
- Plate count agar
- Reactivo Colilert[®] para determinación de coliformes y *Escherichia coli* (IDEXX)
- Solución de hipoclorito de sodio a 1000 ppm (mg/L)

d. Equipo

- Analizador multiparámetros MultiLine P4 (WTW)
- Equipo para determinación de turbiedad del agua TURBIQUANT (MERCK)
- Autoclave de olla Sterilmatic 42 litros.
- Balanza semi analítica monoplato digital (SARTORIUS)
- Cámara de Québec (DARKFIELD)
- Campana de flujo laminar clase II (LABCONCO)
- Enfriador vertical de 3°C – 7°C (WHIRPOOL)
- Espectrofotómetro Spectroquant NOVA 60 (MERCK)
- Estufa con agitador magnético (CORNING)
- Hielera plástica para transporte de muestras (THERMOS)
- Incubadora de 35°C +/- 0.5°C (PREMLAB)

- Lámpara de luz ultravioleta de 366nm (MERCK)
- Mechero tipo bunsen
- Pipetor (BRAND)
- Potenciómetro Inolab y electrodo (WTW)
- Sellador de bandejas Quanti – Tray 200 Sealer modelo 2X (IDEXX)
- Termómetro de mercurio (-10° – 110°C)

e. Controles

- Ampollas para el control de esterilización Sterikom (*B. stearothermophilus*) (MERCK)
- Cepa liofilizada de *Escherichia coli* ATCC 25922 (MICROBIOLOGICS)
- Estándar 0.5 de McFarland
- Patrones estándar para la calibración del turbidímetro de 0.1, 1.0, 100 UNT (Unidades nefelométricas de turbiedad).

f. Transporte

- Vehículo Pick-up 4 x 4

C. Metodología

1. Toma de muestra

Se utilizaron recipientes plásticos de 1L para los análisis fisicoquímicos. Se enjuagó con el agua de la fuente a analizar varias veces antes de tomar la porción de muestra y luego se llenó completamente el recipiente con la muestra (los recipientes se utilizaron limpios, sin contaminantes y/o preservantes). Para los análisis microbiológicos se utilizaron recipientes de vidrio de boca ancha y tapones de rosca esterilizados con capacidad máxima de 150ml, los que se llenaron dejando un espacio de aire de por lo menos 2.5cm entre la tapa del recipiente y la muestra de agua. Al tomar la muestra se colocó la cubierta de papel y el cáñamo sobre la tapadera (50). Por último se colocaron las muestras para análisis microbiológico en una hielera conteniendo hielo (<7 °C) y se transportaron al laboratorio para su análisis.

Dependiendo del tipo de fuente a analizar se tomaron las muestras según las siguientes indicaciones:

- No se abrieron los recipientes hasta el momento de la toma de muestra (50).
- En un nacimiento se tomaron las muestras a media profundidad, sin remover el fondo (50).
- En pozos artesanales, se tomaron las muestras sujetando los recipientes al balde utilizado para sacar agua y luego se sumergieron los contenedores en el pozo (50).

- En pozos mecánicos o con bomba manual, se tomaron las muestras dejando correr el agua de 5-10 minutos. Para los análisis microbiológicos se desinfectó la boquilla del grifo o tubería con una solución desinfectante (hipoclorito de sodio a 100 mg/L) y luego se tomaron las muestras utilizando los recipientes estériles (50).
- Se tomaron las muestras en los puntos de donde la gente obtiene el agua para su consumo.

En el punto de muestreo se determinó la concentración de oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura, pH y turbiedad de las muestras obtenidas, utilizando el Multiliner y Turbidímetro.

Se registraron los datos de las muestras indicando: el número de identificación (1, 2, 3, etc.), fecha, hora, nombre de la comunidad, tipo de fuente y sus características.

2. Procedimiento

a. Análisis fisicoquímico

Utilizando el analizador multiparámetros Multiliner P4 WTW[®] (Wissenschaftlich-Technische-Werkstätten GMBH & Co.) y turbidímetro, se determinó la concentración de oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura, pH y turbiedad de las muestras.

i. Oxígeno disuelto

- Se calibró el equipo de acuerdo al rango admisible para la calibración que es de 0.6 – 1.25 mg/L oxígeno disuelto, luego se presionó el botón (*pH/mV O₂ x*) para seleccionar el modo de O₂ (concentración de oxígeno).
- Se introdujo el electrodo en la muestra, luego se presionó el botón *Run/Enter*.
- Para estabilizar la lectura, se agitó suavemente el electrodo en forma circular. Al iniciar la medición en la pantalla apareció AR intermitente, se esperó hasta que AR dejó de titilar y que apareció el valor de la concentración de oxígeno disuelto, por último se leyó la concentración de oxígeno disuelto en mg/L y se registró.

ii. Conductividad

- Se calibró el equipo de acuerdo al rango admisible para la calibración que es de 1µS/cm – 2 S/cm, luego se presionó el botón (*pH/mV O₂ x*) y seleccionó el modo de conductividad eléctrica.
- Se lavó el electrodo con agua destilada y se introdujo el electrodo en la muestra.
- En seguida se presionó el botón de *Run/Enter*. Al iniciar la medición en la pantalla apareció AR y se esperó a que AR desapareciera de la pantalla.
- Por último se leyó el valor de conductividad eléctrica en µS/cm y se registró.

iii. pH y temperatura

- Se calibró el equipo de acuerdo al rango admisible para la calibración que es de -50.0 mV/pH a -62.0 mV/pH. Luego se presionó el botón (*pH/mV O₂ x*) y seleccionar el modo de pH/mV.
- En seguida se lavó el electrodo con agua destilada y se introdujo el electrodo en la muestra.
- Inmediatamente se presionó el botón de *Run/Enter*. Al iniciar la medición en la pantalla apareció AR y se esperó a que AR desapareciera de la pantalla.
- Luego se leyó el valor de pH en unidades de pH y el valor de la temperatura en °C y se registraron los datos.

iv. Turbiedad

- Se calibró el equipo utilizando los tres patrones estándar para la calibración, luego se lavó la celda con la muestra tres veces y se cerró la celda con el tapón de protección.
- Se alineó la celda y se leyó el valor en unidades nefelométricas de turbiedad (UNT) y se registró.

b. Análisis microbiológico

Las muestras se analizaron lo más pronto posible, determinando la carga bacteriológica de cada punto muestreado utilizando las técnicas de:

- Conteo heterotrófico en placa, por el método de vertido en placa.
- Cuantificación de coliformes totales y *Escherichia coli* por el método de número más probable basado en la tecnología del sustrato enzimático definido Colilert® de IDEXX®.

i. Conteo heterotrófico en placa

- Se rotuló cada placa con el número de muestra, dilución y fecha.
- Luego se prepararon las diluciones adecuadas para cada tipo de muestra, seleccionando las diluciones de tal forma de que el número de colonias fuera de 30 a 300 UFC/ml de muestra.
- Se mezcló completamente cada muestra y sus diluciones con movimientos rápidos y completos hacía arriba y abajo (o adelante y atrás).
- En seguida se midieron las porciones de muestras (en directo o diluciones decimales) utilizando pipetas estériles de 1.0 ml y después se vertió el volumen de muestra adecuado para cada dilución.
- Luego se vertió el medio fundido dentro de las placas petri agitando las placas logrando la mezcla completa del medio y la muestra.
- Por 10 minutos se dejó solidificar el medio e inmediatamente se invirtieron las cajas.

- Por último se incubaron a 35 °C +/- 0.5°C por 48 horas.
- Al completar las 48 horas se realizó la lectura en cámara de Québec de las cajas que presentaron entre 30 – 300 Unidades formadoras de colonias.
- Se reportó como unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/ml), en agar PCA a 35°C por 48 horas por el método de vertido en placa (50).
- Como control de esterilidad del agar PCA, se vertieron 15ml de medio en una caja petrí desechable y se dejó solidificar, luego se incubó por 48 horas a 35 °C +/- 0.5°C junto con las muestras analizadas.
- Se reportó como control de esterilidad negativo si no hay crecimiento.

ii. Cuantificación de coliformes totales y *Escherichia coli* por el método de número más probable Colilert[®], basado en la tecnología del sustrato enzimático definido de IDEXX[®]

- Antes de procesar las muestras de aguas utilizando el método Colilert[®] de IDEXX[®], se realizaron controles de funcionalidad del reactivo Colilert[®], preparando una suspensión de bacterias de la cepa liofilizada de *Escherichia coli* ATCC 25922 (MICROBIOLOGICS[®]) utilizando el estándar 0.5 de McFarland ($1,5 \times 10^8$ UFC/ml).
- Luego se inoculó con 1ml de la suspensión, 100 ml de agua desmineralizada estéril (Dilución 1:10) y se agitó y proceso junto con las muestras captadas.
- Se reportó como control de funcionalidad positivo para coliformes al observar pozos amarillos y fluorescencia positiva con la lámpara de luz UV de 366 nm como positivo para *Escherichia coli*.
- Cada bandeja se rotuló por la parte de atrás con el número de muestra, dilución y fecha.
- Se prepararon las diluciones adecuadas para cada tipo de muestra y se vertieron en los recipientes estériles de IDEXX[®] 100 ml de muestra (hasta el aforo), luego se agregó el reactivo en polvo Colilert[®], se cerraron los envases y luego se agitaron hasta que se disolvió el reactivo completamente.
- Luego se agregó la mezcla de reactivo y muestra en cada bandeja de 97 pozos Colilert[®] y enseguida se introdujeron en el sellador de bandejas Quany-Tray[®] 2000.
- Las bandejas selladas se incubaron a 35 °C +/- 0.5°C por 24 - 28 horas.
- Al completar el tiempo de incubación se los pozos que presentaron color amarillo, los cuales son positivos para coliformes y los pozos que presentaron fluorescencia, bajo la luz ultra violeta de 366nm, los cuales fueron positivos para *Escherichia coli*.
- Utilizando la tabla de número más probable para 97 pozos de Colilert[®], se determinó el valor obtenido de acuerdo al número de pozos positivos para cada caso (50, 52, 116).

c. Método para la aplicación de SODIS

Para la aplicación del método SODIS se siguieron las siguientes indicaciones:

- Se verificó que las condiciones climáticas fueran las adecuadas para el proceso.
- Se utilizaron botellas de tereftalato de polietileno (PET) de 2 litros sin etiqueta, con tapón de rosca, que no estuvieran ralladas, sucias, quebradas y que la tapa cerrara perfectamente.
- En cada punto se vertió agua en las botellas a $\frac{3}{4}$ partes de la capacidad y luego se agitó por 20 segundos y por último se terminó de llenar la botella, procurando que al colocar la botella en forma horizontal no se sobrepasaran los 10cm de profundidad.
- Luego se cerraron las botellas fuertemente y se colocaron sobre un trozo de madera, de tal forma que quedaran inclinadas hacia el sol.
- Las muestras no se filtraron por no tener una turbiedad mayor de 30 UNT.
- Las botellas llenas se expusieron al sol durante 8 horas consecutivas entre las 09h 30 y las 17h 30 (11-13, 78) (Anexo No. 6).
- Por la distancia entre los puntos de muestreo se decidió tomar las muestras de lugares más cercanos entre sí y colocar las botellas en un área equidistante de los puntos seleccionados, excepto para los sitios 1, 2 y 3.
- Al finalizar el tiempo de exposición las muestras se colocaron en una hielera con hielo y se transportaron al laboratorio a una temperatura menor a los 7°C.
- En el laboratorio, se analizó cada muestra por los métodos microbiológicos descritos en análisis microbiológicos.

D. Diseño de investigación

1. Diseño de muestreo

Para este estudio el tipo de muestreo efectuado fue no probabilístico, realizando una comparación de las variables de coliformes totales y *Escherichia coli* antes y después de la aplicación del método SODIS. Como marco muestral se escogieron por conveniencia 3 comunidades de San Juan Sacatepéquez, tomando en cuenta su fácil acceso y las distancias entre estas y la ciudad capital. De cada una estas comunidades identificadas como comunidad I, comunidad II y comunidad III, se eligieron 3 fuentes de aguas naturales utilizadas por las personas del lugar para su consumo, las cuales se identificaron como los puntos 1 y 2 para la comunidad I; punto 3 para la comunidad II; y los puntos 4,5,6,7,8 y 9 para la comunidad III.

El estudio se dividió en dos etapas: en la primera se determinó la calidad microbiológica y las características fisicoquímicas del agua cada punto, que influyen en la aplicación del método SODIS de acuerdo a los métodos descritos en la metodología; y en la segunda etapa se realizaron los análisis microbiológicos antes de la aplicación del método de desinfección solar SODIS, la aplicación del método

SODIS de acuerdo al procedimiento descrito en la sección de métodos y el análisis microbiológico después de la aplicación de SODIS.

Para que el estudio fuera estadísticamente válido, por conveniencia se establecieron 10 puntos muestrales por fuente de agua para la primera etapa y 10 puntos muestrales por fuente de agua para la segunda etapa, haciendo un total de 180 puntos muestrales, los cuales constituyeron el marco muestral. Cada punto muestral se identificó numéricamente de 1 a 90 para la primera etapa y de 91 a 180 para la segunda etapa. Utilizando la herramienta de análisis estadístico “muestreo” del programa Excel[®] de Microsoft XP[®], se seleccionaron al azar 36 muestras (16 en la primera etapa y 20 en la segunda etapa) de los 180 puntos muestrales, que representaron el 20% del total de puntos muestrales del marco de muestreo como se indica en el Anexo No. 7.

En la primera etapa se analizaron 16 muestras distribuidas al azar en los nueve puntos de muestreo, para determinar la calidad microbiológica y las condiciones fisicoquímicas del agua que influyen en el método SODIS y así establecer si el agua en cada punto presentaba contaminación por bacterias del grupo coliforme y *E. coli*; y si cumplían o no con las especificaciones de SODIS para su aplicación.

En la segunda etapa, para la aplicación de SODIS, inicialmente se tomaron 16 muestras de agua (tomando la misma distribución de la etapa 1) en los 9 puntos seleccionados, con el objetivo de realizar el análisis basal de los recuentos de bacterias heterótrofas, conteos de bacterias del grupo coliforme total y *Escherichia coli*, antes de la aplicación de SODIS. Luego se tomaron 20 muestras del segundo grupo de 90 puntos muestrales para la aplicación del método SODIS, de acuerdo al procedimiento descrito en la sección de métodos y el análisis microbiológico después de la aplicación del método.

2. Análisis de resultados

El análisis estadístico se realizó utilizando la prueba de hipótesis *t de Student* para un solo grupo de muestras pareadas (15 parejas de datos), transformando a logaritmos los conteos de bacterias del grupo coliforme y *Escherichia coli* como indicadores de contaminación del agua antes y después de la aplicación del método SODIS con un nivel de significancia del 5% ($\alpha= 0.05$). Para esto se calculó la media y varianza del antes y después de la aplicación de SODIS y luego se aplicó la prueba *t de Student*.

VII. RESULTADOS

A. Primera etapa

En la primera etapa del estudio se ubicaron nueve puntos utilizados para la captación de agua para el consumo por las personas de las comunidades seleccionadas de San Juan Sacatepéquez, tomando en cuenta su accesibilidad, características físicas, ausencia de tratamiento físico como filtración, sedimentación, coagulación, floculación y tratamiento químico (Anexo No. 8).

Luego de la ubicación de los nueve puntos de muestreo, se captaron 16 muestras o puntos muestrales de acuerdo a la distribución descrita en el Anexo No.7.

En cada muestra de agua se midió *in situ*: el pH en unidades de pH, la temperatura en grados Celcius (°C), la conductividad eléctrica en micro siemens por centímetro cuadrado ($\mu\text{Sm}/\text{cm}^2$) y el oxígeno disuelto en miligramos por litro (mg/L) y en el laboratorio se midió la turbiedad en Unidades nefelométricas de turbiedad (UNT), obteniéndose los resultados descritos en la tabla No.1.

Tabla No. 1 Resultados de los análisis fisicoquímicos realizados en nueve puntos de fuente de agua no tratada utilizadas para consumo humano en San Juan Sacatepéquez, seleccionadas por conveniencia y ubicación

Punto No.	Tipo de fuente	pH	Temperatura	Conductividad eléctrica	Oxígeno disuelto	Turbiedad
		Unidades de pH	<i>in situ</i> °C	$\mu\text{Sm}/\text{cm}^2$ ⁽¹⁾	mg/L O ₂ ⁽²⁾	UNT ⁽³⁾
		6.5-8.5 ⁺	15-34 ⁺	<1500 ⁺	3.0 ⁺⁺	30 ⁺⁺⁺
1	Pozo	6.5	21	215	4.64	0.30
		6.5	21	215	4.60	0.26
2	Pozo	6.4	20	202	4.98	0.21
		6.5	23	330	6.31	0.85
3	Nacimiento	6.5	23	325	6.29	0.80
		6.8	20	514	3.12	1.85
4	Pozo	6.8	20	510	3.10	1.89
		6.7	18	336	5.10	2.15
5	Pozo	6.6	22	356	4.64	9.02
6	Pozo	6.4	21	719	3.95	0.70
		6.4	21	720	3.97	0.67
7	Pozo	6.6	22	424	5.07	5.40
		6.5	22	430	5.10	5.90
		6.6	22	429	5.09	6.10
8	Pozo	6.7	22	197	4.53	1.05
		6.8	22	195	4.50	1.10

(1) $\mu\text{Sm}/\text{cm}^2$: Micro siemens por centímetro cuadrado, unidad de medida para la conductividad eléctrica.

(2) mg/L: Miligramos por litro

(3) UNT: Unidades nefelométricas de turbiedad

+ Parámetros de la norma COGUANOR NGO 29 001:99 1ra revisión para agua apta para consumo humano

++ Concentración mínima de oxígeno disuelto en aguas no contaminadas o poco contaminadas.

+++ Límite máximo de turbiedad para que el método SODIS sea efectivo.

Fuente: Datos experimentales.

De los cultivos realizados de las muestras de agua de los puntos seleccionados se obtuvieron los resultados descritos en la tabla No. 2.

Tabla No. 2 Resultados de los análisis microbiológicos realizados en nueve puntos de fuente de agua no tratada utilizadas para consumo humano en San Juan Sacatepéquez, seleccionadas por conveniencia y ubicación

Punto No.	Tipo de fuente	CHP ⁽¹⁾	CT ⁽²⁾	EC ⁽³⁾	A-NA ⁽⁴⁾	Riesgo
		UFC/ml ⁺	NMP/100 ml ⁺⁺	NMP/100 ml ⁺⁺		OMS ⁺⁺⁺
1	Pozo	4.50E+05	7.24E+02	0.00E+00	NA	Libre
		4.90E+05	7.12E+02	2.00E+00	NA	Bajo
2	Pozo	1.90E+06	3.91E+03	2.08E+02	NA	Alto
3	Nacimiento	5.20E+05	2.60E+03	2.83E+02	NA	Alto
		5.50E+05	2.86E+03	2.72E+02	NA	Alto
4	Pozo	1.50E+06	3.24E+04	6.30E+00	NA	Bajo
		1.20E+06	3.11E+04	4.10E+00	NA	Bajo
5	Pozo	3.35E+05	2.83E+03	1.10E+02	NA	Alto
6	Pozo	6.40E+06	5.67E+03	2.03E+00	NA	Bajo
7	Pozo	6.30E+05	3.32E+03	4.32E+02	NA	Alto
		6.00E+05	3.95E+03	5.04E+02	NA	Alto
8	Pozo	5.50E+06	3.32E+04	1.48E+03	NA	Muy alto
		6.00E+06	3.95E+04	1.75E+03	NA	Muy alto
		6.60E+06	4.26E+04	1.85E+03	NA	Muy alto
9	Pozo	5.40E+06	2.13E+03	2.13E+03	NA	Muy alto
		7.20E+06	2.16E+03	2.16E+03	NA	Muy alto

(1) CHP: Conteo heterotrófico en placa

(2) CT: Bacterias del grupo coliforme total

(3) EC: *Escherichia coli*

(4) A-NA: De acuerdo al análisis de las muestras, las aguas de las fuentes analizadas son aptas o no aptas para consumo humano, según la norma COGUANOR NGO 29001:99 1ra revisión para agua apta para consumo humano

+ UFC/ml: Unidades formadoras de colonia por mililitro

++ NMP/100ml: Número más probable por cada cien mililitros. 0.00E+00 equivale a <1NMP/100 ml

+++ Organización Mundial de la Salud: Criterios de clasificación del agua utilizada para consumo humano de acuerdo a la carga de *E. coli*.

Fuente: Datos experimentales.

B. Segunda etapa

En la segunda etapa del estudio inicialmente se tomaron 16 muestras de agua de los nueve puntos seleccionados de acuerdo a la distribución aleatoria de la primera etapa, con el objetivo de realizar el análisis basal de los recuentos de bacterias heterótrofas, conteos de bacterias del grupo coliforme total y *Escherichia coli*.

Luego se tomaron 20 muestras del segundo grupo de 90 puntos muestrales, de acuerdo a la distribución aleatoria de la segunda etapa para la aplicación del método SODIS, de acuerdo al procedimiento descrito en la sección de métodos y el análisis microbiológico después de la aplicación del método.

Paralelo a las muestras se utilizó una botella control con agua desmineralizada inoculada con la cepa de *E. coli* ATCC 25922 con un conteo inicial de $\geq 2.42 \times 10^8$ NMP/100ml. Al iniciar el proceso de exposición de las botellas a la radiación solar según el método SODIS a las 09h 30 de la mañana, se determinó que la temperatura ambiente fue de 22°C y alcanzó su pico máximo a las 14h 30, que comenzó a disminuir a las 17h 00. Al finalizar las ocho horas de exposición recomendadas por SODIS (17h 30), la temperatura ambiental registrada fue de 24°C (Anexo No. 9).

De la misma forma se midió la temperatura de las aguas expuestas a la radiación solar utilizando una botella control con agua desmineralizada. La temperatura inicial fue de 18°C y se alcanzó una temperatura máxima en la botella control de 36°C a las 15h 30 o sea a las 6 horas de exposición a los rayos solares. Al finalizar el proceso, la temperatura en la botella control disminuyó a 35°C. En relación a la intensidad de radiación UV, no pudo medirse por falta del equipo para su comprobación (Anexo No. 9). En el laboratorio se determinó el conteo de bacterias heterótrofas por el método de vertido en placa en PCA (Agar plate count) después de la aplicación de SODIS, obteniéndose los resultados detallados en la tabla No.3.

Tabla No. 3 Conteos de bacterias heterótrofas por el método de vertido en placa en agar PCA antes y después de la aplicación de SODIS durante el mes de febrero, en muestras de fuentes de agua no tratada utilizadas para el consumo humano en nueve puntos de San Juan Sacatepéquez

Punto No.	Tipo de fuente	Antes de la aplicación de SODIS	Después de la aplicación de SODIS
		CHP UFC/ml	CHP UFC/ml
1	Pozo	2.30E+05	5.30E+02
		4.80E+05	
2	Pozo	1.50E+05	1.00E+05
			1.20E+05
3	Nacimiento	4.60E+05	7.00E+02
		1.35E+06	2.85E+03
			5.00E+02
			2.80E+03
4	Pozo	9.40E+05	2.50E+05
		9.40E+05	2.60E+05
5	Pozo	3.60E+05	6.00E+02
			1.74E+03
			1.50E+03
6	Pozo	4.00E+05	2.65E+03
7	Pozo	3.50E+05	1.50E+05
		3.00E+05	1.60E+05
8	Pozo	3.00E+06	3.80E+05
		3.00E+06	3.50E+05
		3.00E+06	3.94E+05
9	Pozo	3.00E+05	2.20E+05
		3.00E+05	2.30E+05

CHP: Conteo heterotrófico en placa UFC/ml: Unidades formadoras de colonia por mililitro
Fuente: Datos experimentales.

Para evaluar la eficiencia del método SODIS en relación a la reducción de bacterias heterótrofas, al ser aplicado en muestras de agua contaminadas en San Juan Sacatepéquez, se tomó como parámetro de calidad el límite establecido anteriormente por la OMS y COGUANOR para agua para consumo humano de 500 UFC/ml (Unidades formadoras de colonia por mililitro de muestra), determinándose que en el 100% de las

muestras después de SODIS (20 muestras), el conteo no se redujo al límite establecido para agua para consumo humano.

Por el método del sustrato enzimático definido Colilert se cuantificó la carga de coliformes totales y *E. coli* en las muestras de agua tomadas antes y después del tratamiento SODIS, expuestas a la radiación solar por ocho horas en San Juan Sacatepéquez, obteniendo los resultados indicados en la Tabla No.4 para los recuento de coliformes totales y en la Tabla No. 5 para los recuentos de *E. coli*. Para la evaluación de la eficiencia del método en relación a la reducción del conteo de bacterias del grupo coliforme total y *Escherichia coli* se tomaron como parámetros de calidad los límites establecidos en la norma COGUANOR para agua potable vigentes actualmente de <1NMP/100 ml (Menor a un número más probable por 100 mililitros de muestra). Luego de la aplicación de SODIS se determinó que el conteo de coliformes totales disminuyó en 13 muestras (65%) a <1NMP/100 ml de un total de 20 muestras (Tabla No. 4).

Tabla No. 4 Conteos de bacterias del grupo coliforme total por el método del sustrato enzimático definido Colilert antes y después de la aplicación de SODIS durante el mes de febrero, en muestras de fuentes de agua no tratada utilizadas para consumo humano en nueve puntos de San Juan Sacatepéquez

Punto No.	Tipo de fuente	Antes de la aplicación de SODIS	Después de la aplicación de SODIS
		CT NMP/100 ml	CT NMP/100 ml
1	Pozo	7.24E+02	0.00E+00
		6.50E+02	
2	Pozo	2.76E+03	0.00E+00
			0.00E+00
3	Nacimiento	2.42E+03	0.00E+00
		2.42E+03	0.00E+00
			0.00E+00
			0.00E+00
4	Pozo	2.42E+04	0.00E+00
		2.42E+04	1.00E+00
5	Pozo	2.42E+03	0.00E+00
			0.00E+00
			0.00E+00
6	Pozo	4.35E+03	0.00E+00
7	Pozo	2.42E+03	9.30E+01
		2.42E+03	1.00E+00
8	Pozo	3.08E+04	1.90E+01
		3.13E+04	1.36E+02
		2.50E+04	1.36E+02
9	Pozo	2.42E+03	3.30E+01
		2.42E+03	0.00E+00

CT: Bacterias del grupo coliforme total NMP/100 ml: Número más probable por cada cien mililitros.

Fuente: Datos experimentales

En relación a los conteos de *Escherichia coli* antes y después de la aplicación de SODIS por el método del sustrato enzimático definido Colilert, se obtuvo que en 15 muestras (75%) se redujo a <1NMP/100 ml de *E. coli* de un total de 20 muestras.

Tabla No. 5 Conteos de *Escherichia coli* por el método del sustrato enzimático definido Colilert antes y después de la aplicación de SODIS durante el mes de febrero, en muestras de fuentes de agua no tratada utilizadas para consumo humano en nueve puntos de San Juan Sacatepéquez

Punto No.	Tipo de fuente	Antes de la aplicación de SODIS	Después de la aplicación de SODIS	Riesgo ⁺ OMS ⁺⁺
		EC NMP/100 ml	EC NMP/100 ml	
1	Pozo	2.00E+00	0.00E+00	Libre
		2.30E+00		
2	Pozo	2.00E+00	0.00E+00	Libre
			0.00E+00	
3	Nacimiento	1.72E+02	0.00E+00	Libre
		2.06E+02	0.00E+00	Libre
			0.00E+00	Libre
			0.00E+00	Libre
4	Pozo	1.10E+01	0.00E+00	Libre
		1.00E+01	0.00E+00	Libre
5	Pozo	1.50E+01	0.00E+00	Libre
			0.00E+00	Libre
			0.00E+00	Libre
6	Pozo	1.20E+02	0.00E+00	Libre
7	Pozo	7.30E+01	1.50E+01	Intermedio
		5.90E+01	0.00E+00	Libre
8	Pozo	3.08E+04	4.00E+00	Bajo
		3.13E+04	1.14E+02	Alto
		2.50E+04	7.80E+01	Intermedio
9	Pozo	2.42E+03	7.00E+00	Bajo
		2.42E+03	0.00E+00	Libre

EC: *Escherichia coli* NMP/100 ml: Número más probable por cada cien mililitros.

Fuente: Datos experimentales

+ Clasificación de muestras de agua después de SODIS.

++ Organización Mundial de la Salud: Criterios de clasificación del agua utilizada para consumo humano de acuerdo a la carga de *E. coli*.

En la botella control, el conteo inicial de *E. coli* ATCC 25922 fue de $\geq 2.42 \times 10^8$ NMP/100 ml y luego de la aplicación de SODIS se redujo <1.0NMP/100 ml (Tabla No. 6).

Tabla No. 6 Número más probable de *Escherichia coli* ATCC 25922 por el método del sustrato enzimático definido Colilert antes y después de la aplicación de SODIS en la botella control

Antes de la aplicación de SODIS	Después de la aplicación de SODIS	Reducción después de SODIS
EC ATCC 25922 NMP/100 ml	EC ATCC 25922 NMP/100 ml	%
>2.42E+08	0.00E+00	100.0

EC: *Escherichia coli* NMP/100 ml: Número más probable por cada cien mililitros.

ATCC: American type culture collection

Fuente: Datos experimentales

De acuerdo al diseño estadístico se tomaron en cuenta para la evaluación del método SODIS por la prueba *t de Student* para medias de dos muestras pareadas, solamente 15 parejas de datos (datos pareados) de los conteos de coliformes y *E. coli* antes y después de la aplicación de SODIS.

Para realizar el análisis estadístico de las 15 parejas de datos, se transformaron a logaritmos los conteos de bacterias heterótrofas, coliformes totales y *E. coli* antes y después de la aplicación de SODIS, agregando una constante numérica a los datos de coliformes totales y *E. coli* (LOG + 1). Con estos datos se calculó la Media y Varianza para luego aplicar la prueba *t de Student*, obteniéndose los datos descritos en la Tabla No. 7.

Tabla No. 7 Prueba “*t de Student*” para medias de dos muestras pareadas, para los conteos microbiológicos transformados a logaritmos antes y después de la aplicación de SODIS, durante el mes de febrero en muestras de fuentes de agua no tratada, utilizadas para consumo humano en nueve puntos de San Juan Sacatepéquez

Análisis estadístico	Recuentos de Heterótrofos ⁽¹⁾		Conteo de Coliformes totales ⁽¹⁾		Conteo de <i>E. coli</i> ⁽¹⁾	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Media	5.78949	4.58948*	3.85184	0.64541**	2.31421	0.45097***
Varianza	0.18714	1.33879	0.46726	0.78539	1.98494	0.53935
Observaciones	15	15	15	15	15	15

(1) Prueba *t de Student* aplicada a los datos transformados a logaritmos.

* p = 0.00072 ** p = <0.00001 ***p = <0.00001

Fuente: Datos experimentales.

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la primera etapa del estudio se seleccionaron nueve puntos de muestreo, ubicando fuentes de agua utilizadas para consumo humano en San Juan Sacatepéquez, en los cuales se observó como factor común que los puntos de abastecimiento no contaban con barreras físicas efectivas, que permitieran evitar la contaminación del agua, además de que se observaron letrinas a corta distancia, animales domésticos como aves de corral y cerdos cerca de los pozos; y en algunos casos la poca profundidad de los pozos de agua, los cuales son contaminados por escorrentías, agua de riego, desechos sólidos de los propietarios como recipientes, bolsas y pelotas plásticas. En el caso del nacimiento se observó que a pocos metros de distancia se encuentra un río de aguas negras, el cual puede ser la causa principal de la contaminación de este punto.

Luego de la ubicación de los nueve puntos, se midió la concentración de oxígeno disuelto, la conductividad eléctrica, temperatura, pH y los niveles de turbiedad del agua de los puntos de muestreo, determinándose que en las muestras de los puntos 1, 3, 4, 5, 6, 8 y 9; el pH estuvo dentro del rango establecido por COGUANOR (51) y que en los puntos 2 y 7 (Tabla No. 1), el pH fue levemente menor al límite mínimo de 6.5 establecido para agua potable. Lo que puede atribuirse a que los elementos disueltos, el tipo de suelos y la contaminación con fertilizantes y pesticidas disminuyen o elevan el pH del agua, lo que es muy probable debido a que San Juan Sacatepéquez es una zona agrícola en la cual se cultivan flores ornamentales, vegetales y granos como el maíz y el café.

Teóricamente las aguas naturales están en el rango de 4.0 hasta 8.5 unidades de pH (50), pero COGUANOR (51) establece que el pH en el agua para consumo humano debe estar en el rango de 6.5 a 8.5 unidades de pH, lo que es importante porque el método SODIS no corrige las condiciones fisicoquímicas del agua tratada, sino solamente la calidad microbiológica (11, 12, 77, 84, 110).

Las temperaturas medidas *in situ* en las muestras tomadas estuvieron dentro del rango de 18°C hasta 23°C (Tabla No. 1), lo cual permite un ambiente favorable para el crecimiento de microorganismos mesófilos. Sin embargo estas temperaturas pueden variar, ya que dependen de la hora del día, la profundidad del pozo y la ubicación de la fuente de agua.

Las lecturas de conductividad eléctrica relativamente bajas, entre 195 y 720 $\mu\text{Sm}/\text{cm}^2$ (Tabla No. 1), son un indicador de que las concentraciones de iones disueltos probablemente se encuentran dentro de los límites aceptables para el consumo humano, sin embargo esto solamente puede comprobarse al cuantificar las concentraciones de metales y iones disueltos que tengan incidencia en la aceptación y salud del consumidor. De acuerdo a COGUANOR (51) el LMP (límite máximo permisible) para agua para consumo humano es de 1500 $\mu\text{Sm}/\text{cm}^2$.

Los niveles de oxígeno disuelto medidos entre 3.1 y 6.3 mg/L O₂, probablemente se debe a que el agua en los pozos de esta área es estacionaria, no hay corrientes que provoquen la disolución del oxígeno del ambiente en el agua, lo que significa que si a la temperatura promedio de 21°C (Tabla No.1), la concentración de oxígeno disuelto debería ser de 9 mg/L, el porcentaje de saturación de oxígeno en las muestras fue del 34% al 70%, lo que significa que a estos niveles de oxígeno los microorganismos aerobios como las bacterias, algas y microorganismos anaerobios facultativos como los coliformes, logran su sobrevivencia y desarrollo en el agua subterránea y superficial de esta región.

La concentración de oxígeno disuelto en el agua también está relacionada a la cantidad de materia orgánica disuelta y los procesos químicos y biológicos que se desarrollan en el sistema (agua): a mayor contaminación menor oxígeno disuelto (33, 34). Esto es relevante porque en las aguas que presentan contaminación fecal, los niveles de nitritos pueden ser altos debido al bajo contenido de oxígeno y la alta cantidad de materia orgánica, incluyendo fertilizantes y pesticidas que contengan compuestos nitrogenados. Sin embargo los niveles de turbiedad del agua indican que no existen elevados contenidos de sólidos por altos niveles de contaminación con arcillas, materia orgánica, materia inorgánica, algas u otros microorganismos.

Los niveles de turbiedad determinados estuvieron en el rango de 0.21 a 9.02 UNT (Tabla No. 1), los que son menores al límite máximo de 30 UNT recomendado por SODIS para la aplicación del método, lo que permitió establecer que el agua de los nueve puntos muestreados podían tratarse con el método SODIS (Tabla No.1). Si en alguno de los puntos la turbiedad hubiera sido mayor a 30 UNT, se tendría que haber filtrado el agua utilizando un paño de tela limpio, de acuerdo a las recomendaciones de SODIS para la aplicación del método (11-13, 18, 23, 24, 78, 93 – 95).

Las concentraciones de oxígeno disuelto, las lecturas de conductividad eléctrica, temperatura y pH, indican que las muestras de agua aparentemente no presentan niveles de contaminación de riesgo para los consumidores en los puntos muestreados. Lo que significa que químicamente el agua de los puntos muestreados en San Juan Sacatepéquez, cumplieron con los parámetros establecidos por la norma COGUANOR para agua potable (51). Aunque para determinar la calidad química del agua, es necesario realizar estudios que permitan establecer los niveles de iones como nitratos, nitritos, sulfatos, fosfatos, metales pesados como plomo, arsénico, mercurio, cadmio y niveles de contaminación por pesticidas y fertilizantes.

En relación a los resultados de los análisis microbiológicos, luego de la lectura de los cultivos bacteriológicos se demostró la contaminación del 100% de las muestras por coliformes y del 94% por *Escherichia coli*, lo que significa que los nueve puntos muestreados, utilizados para la captación de agua para consumo humano representan un alto riesgo sanitario para las personas que consumen el agua sin tratamiento en San Juan Sacatepéquez, lo que concuerda con los datos reportados por Reller ME. *et al* (30), en un estudio realizado en San Juan Sacatepéquez sobre la calidad sanitaria del agua en esta región. Además pone en

evidencia la necesidad de la aplicación de un método de desinfección a nivel domiciliario que sea factible de aplicar y económicamente sostenible como SODIS (Tabla No.2).

Al comparar los resultados microbiológicos de las muestras analizadas, en los cuales los conteos de bacterias del grupo coliforme total fueron desde 7.24×10^2 hasta 4.6×10^4 NMP/100 ml y de *E. coli* desde <1 hasta 2.16×10^3 NMP/100 ml (Tabla No. 2); con los criterios establecidos por COGUANOR que es específica para agua apta para consumo humano o agua potable (51), ninguna de las muestras de agua se considera apta para consumo humano, ya que se establece que los conteos de coliformes y *E. coli* deben ser <1 NMP/100 ml, utilizando el método del sustrato enzimático definido de Colilert.

De la misma forma, al comparar los resultados obtenidos de las muestras de agua no tratada de los nueve puntos muestreados, con los criterios de la OMS para el agua utilizada para consumo humano, las muestras de los puntos 1, 4 y 6 se catalogaron como agua de bajo riesgo (1-10NMP/100ml de *E. coli*); los puntos 2, 3, 5 y 7 como agua de alto riesgo (100-1000 NMP/100 ml de *E. coli*) y los puntos 8 y 9 como agua de muy alto riesgo (>1000 NM/100 ml de *E. coli*) (11, 33), lo que significa que 6 de los 9 puntos muestreados presentaron una alta contaminación fecal, siendo estos los puntos más expuestos a la contaminación por la falta de protección y de viviendas de escasos recursos.

Por todas estas características se determinó que los nueve puntos seleccionados eran aptos para la aplicación de SODIS, contando con la aprobación de los propietarios luego de explicarles el objetivo del estudio y los beneficios que pueden obtener al aplicarlo en sus hogares y comunidades.

En la segunda etapa del estudio, se tomaron 20 muestras de agua de los puntos seleccionados, distribuidas al azar de acuerdo al marco muestral (Anexo No. 7); en botellas plásticas de 2 litros y bolsas estériles para el análisis microbiológico antes del tratamiento.

La aplicación de SODIS en aguas de San Juan Sacatepéquez se realizó en el mes de febrero y de acuerdo a los datos de la Fundación SODIS la radiación solar UV sobre la superficie de la tierra en el hemisferio norte, es menor entre los meses de noviembre a febrero. El día que se aplicó SODIS, las condiciones climáticas fueron adecuadas para la aplicación del método, presentándose un cielo despejado con nubes dispersas, vientos eventualmente fríos, ocultándose el sol en el área aproximadamente a las 18:00 horas. Sin embargo un factor importante que no pudo medirse, fue la intensidad de radiación UV en el área de prueba, ya que no se contó para este estudio con el equipo de medición (medidor de radiación UVA-UVB solar).

Las muestras se prepararon según las indicaciones de SODIS, llenando las botellas inicialmente hasta la mitad, luego se agitaron y por último se llenaron completamente. Una medición importante que debió realizarse, es la determinación de la concentración de oxígeno disuelto en la botella después de la agitación y luego llenarla completamente, ya que de acuerdo a SODIS a mayor concentración de oxígeno disuelto, mayor

es el efecto de foto oxidación provocado por la formación de radicales libres en el agua, sin embargo no pudo realizarse ya que en la segunda etapa, el equipo de medición ya no estaba disponible para este estudio.

La aplicación de SODIS se realizó de la forma más sencilla reportada utilizando simplemente las botellas expuestas al sol, aunque en estudios anteriores se han probado variantes del método como pintar las botellas, colocar materiales refractivos y la utilización de catalizadores químicos. Otro factor importante fue que las botellas se colocaron directamente sobre el piso debido a la dificultad de colocarlas sobre el techo de las casas, ya que generalmente en la aplicación de SODIS las botellas se colocan sobre los techos u otro lugar elevado para facilitar la exposición a la radiación solar.

Durante la exposición de las botellas al sol, el agua alcanzó una temperatura máxima a las seis horas de exposición de 36.5°C, la cual se mantuvo por 30 minutos (Anexo No. 9). Esta temperatura máxima es menor a la alcanzada en un estudio de la aplicación de SODIS en aguas no tratadas de la ciudad capital de Guatemala, realizado durante el mes de abril, en el cual la temperatura máxima del agua a las seis horas bajo la luz solar fue de 49°C (7).

Esto sugiere que en la época en la que el método SODIS se aplicó en este estudio, probablemente la radiación IR solar no alcanzó la intensidad de exposición radiante ($W \cdot h/m$) necesaria para que la temperatura máxima fuera mayor y que en los meses en los que la temperatura ambiental y la radiación solar sobre la superficie de la tierra aumentan (marzo-junio) en el hemisferio norte, probablemente si se alcanzan mayores temperaturas al exponer las botellas SODIS a la luz solar en esta área.

Las regiones cercanas a la Línea Ecuatorial experimentan un menor número de variaciones en la intensidad de la luz durante el año que las regiones cercanas a los dos hemisferios. Estas variaciones son importantes en la aplicación del método SODIS, ya que depende de la intensidad de radiación solar en el lugar de aplicación (mínimo $500 W/m^2$ por 6 horas), si el método SODIS es eficaz o no (11, 12, 23). Esto significa que en las épocas de menor radiación las botellas tendrían que exponerse al sol por mayor tiempo, como lo sugiere SODIS para días nublados y épocas de lluvia en las cuales el tiempo de exposición de las botellas a la radiación debe ser de 48 horas consecutivas (día y noche) (10, 84).

Otro factor que probablemente influyó en que el agua expuesta al sol no alcanzará mayores temperaturas, fue la presencia de vientos aún fríos que soplaron eventualmente en las áreas de prueba y una temperatura ambiente máxima de 26°C por un máximo de 2 horas, característicos del final de la época fría en Guatemala, la cual termina en febrero.

En el laboratorio se detectó la presencia de coliformes y *E. coli* en todas las muestras de agua sin tratamiento con SODIS de los nueve puntos muestreados. Al comparar estos resultados con los obtenidos en la primera etapa se pudo comprobar que la contaminación del agua en esta región es constante.

Luego de la aplicación de SODIS se observó una reducción considerable en los conteos de heterótrofos, en relación a los conteos iniciales, obteniéndose que en 5 muestras los conteos disminuyeron entre 20% y 57%; y en 15 muestras entre 72% y 99.9%.

Para realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos en este estudio, se transformaron a logaritmos los conteos de bacterias heterótrofas antes y después de la aplicación de SODIS. Al aplicar la prueba *t de Student* utilizando solamente los datos pareados, se determinó que si existe una reducción o diferencia significativa entre los conteos de bacterias heterótrofas antes y después de la aplicación de SODIS, alcanzándose un valor p de 0.00072 ($\alpha = 0.05$) (Tabla No.7).

Para evaluar la eficiencia del método SODIS en relación a la reducción de bacterias heterótrofas, al ser aplicado en muestras de agua contaminadas en San Juan Sacatepéquez, se tomó como parámetro de calidad el límite establecido anteriormente por la OMS y COGUANOR para agua para consumo humano de 500 UFC/ml (Unidades formadoras de colonia por mililitro de muestra). De acuerdo al diseño estadístico se tomaron en cuenta solamente los datos pareados para la evaluación del método (15 de un total de 20 muestras expuestas a la radiación solar), determinándose que en ninguna de las muestras se redujo el conteo después de la aplicación de SODIS al límite establecido para agua para consumo humano.

Esto significa que varias especies de microorganismos heterótrofos (bacterias, hongos y algas) fueron afectadas por la radiación, pero sin embargo otro grupo logró sobrevivir a la radiación UV e IR de la luz solar. Esto puede deberse a que si existe resistencia de algunos microorganismos a las condiciones a las que se sometió las muestras de agua en San Juan Sacatepéquez, lo que probablemente se deba a que algunos géneros y especies de bacterias tienen la capacidad de respuesta o adaptación a las condiciones adversas y cambios en sus ecosistemas, tales como la baja disponibilidad de nutrientes, la formación de biopelículas y acúmulos de células, que probablemente no permiten que la radiación actúe de forma eficiente sobre todos los microorganismos, lo cual confirma lo reportado por la Organización mundial de la salud en relación a las bacterias heterótrofas en aguas oligotróficas (56, 57).

Además existe la posibilidad de la capacidad de reparación de las funciones celulares y en este caso el cultivo en PCA se realizó pocas horas después de exponer las muestras a la radiación solar, por lo que es muy probable que las colonias contadas fueron de células no afectadas por la radiación o que su capacidad de reparación y recuperación les permitiera reproducirse en el medio de cultivo.

Es por esto que el conteo de heterótrofos solamente se consideró como un indicador operativo del proceso y no como un parámetro de calidad sanitario, confirmando el hecho de que los métodos de desinfección a nivel domiciliario no “esterilizan el agua” pero si proveen una alternativa sencilla para mejorar su calidad y reducir la carga bacteriana y aunque existe la probabilidad de que microorganismos patógenos heterótrofos (oportunistas) tales como *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Flavobacterium*, *Klebsiella*, *Moraxella*, *Serratia*,

Pseudomonas y *Xanthomonas*, logren sobrevivir al tratamiento con SODIS, estos no representan un riesgo a la salud de los consumidores (56, 57).

En relación a los conteos de bacterias del grupo coliforme total antes y después de la aplicación de SODIS por el método del sustrato enzimático definido Colilert, se determinó que hubo una reducción hasta del 100% (<1 NMP/100 ml) en 13 (65%) de las 20 muestras analizadas después de la aplicación de SODIS, exponiendo a la radiación solar el agua en botellas plásticas en San Juan Sacatepéquez, lográndose la reducción de cargas desde 10^4 hasta <1 NMP/100 ml en ocho horas bajo la luz solar.

De igual forma los conteos de *E. coli* después de la aplicación de SODIS, se redujeron el 100% (<1 NMP/100 ml) en 15 (75%) de las 20 muestras analizadas.; Además en la botella control con la cepa *E. coli* ATCC 25922 se logró la reducción del 100% de *E. coli* con una carga inicial de $\geq 2.42 \times 10^8$ NMP/100 ml, lo que confirma que el método si es eficiente en esta región y puede aplicarse para mejorar la calidad sanitaria del agua.

Para la evaluación de la eficiencia del método en relación a la reducción del conteo de bacterias del grupo coliforme total y *Escherichia coli* se tomaron como parámetros de calidad los límites establecidos en la norma COGUANOR para agua potable vigentes actualmente de <1NMP/100ml (Menor a uno número más probable por 100 mililitros de muestra) (Tabla No. 4), determinándose que 15 (75%) de las 20 muestras si cumplían con esta norma, comparado con el 0% de no conformidad antes del tratamiento.

Para realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos en este estudio, se transformaron a logaritmos los conteos de coliformes totales y *E. coli* antes y después de la aplicación de SODIS, agregando una constante numérica a los datos de coliformes totales y *E. coli* con el objetivo de eliminar los ceros para el cálculo estadístico (LOG + 1). Al aplicar la prueba *t de Student* utilizando solamente los datos pareados, se determinó que si existe una reducción o diferencia significativa entre los conteos de coliformes antes y después de la aplicación de SODIS, alcanzándose un valor p de 0.00001 ($\alpha = 0.05$). De igual forma para los conteos de *E. coli* se obtuvo un valor p de 0.00001 ($\alpha = 0.05$) determinándose que en ambos casos si existe una diferencia significativa entre el antes y después de la aplicación de SODIS (Tabla No.7).

Entre las razones por las cuales los conteos de coliformes y *E.coli* no se redujeron a <1NMP/100 ml en todas las botellas se puede mencionar los errores en la técnica, como el haber colocado las botellas en el suelo y no sobre el tejado o láminas de las casas; la incidencia no homogénea de la radiación solar sobre todas las botellas y como consecuencia la temperatura máxima alcanzada no fue uniforme para todas las muestras; y el no haber alcanzado una temperatura máxima mayor a los 36°C, ya que en estudios anteriores al alcanzar temperaturas mayores a los 45°C la muerte o inactivación de *E. coli* fue del 100%.

Por lo que es probable que sobre los tejados o láminas de las viviendas, en días con una radiación solar y temperatura ambiente más altas, se logren alcanzar temperaturas mayores en el agua de las botellas y los conteos de coliformes y *E. coli* se reduzcan el 100%.

Esto significa que en las condiciones de prueba, el método SODIS si puede ser aplicado en fuentes de aguas no tratadas en San Juan Sacatepéquez, ya que si permite mejorar la calidad sanitaria del agua contaminada, de tal forma que las muestras de los puntos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 después de SODIS se clasificaron de acuerdo a los criterios de la OMS, como aptas para consumo humano y las de los puntos 7 y 9 como aguas de bajo riesgo, permitiendo mejorar la calidad sanitaria del agua de consumo de sus habitantes con la consecuente mejoría de su salud.

IX. CONCLUSIONES

- A.** La totalidad (100%) de las muestras de agua utilizadas para consumo humano en los puntos seleccionados en San Juan Sacatepéquez para este estudio, presentaron contaminación por bacterias del grupo coliforme total y *E.coli*.
- B.** La concentración de oxígeno disuelto, las lecturas de conductividad eléctrica, temperatura, pH y turbiedad, indican que las muestras de agua utilizadas para consumo humano en los puntos seleccionados en San Juan Sacatepéquez, se encuentran dentro de los parámetros establecidos por la OMS y COGUANOR para agua para consumo humano.
- C.** La turbiedad de las muestras de agua utilizadas para consumo humano en los puntos seleccionados en San Juan Sacatepéquez, permiten la aplicación del método SODIS.
- D.** Los conteos de bacterias heterótrofas, bacterias del grupo coliforme total y *E.coli* en las fuentes de agua de San Juan Sacatepéquez son elevados, catalogándose según los criterios de la OMS desde agua de bajo riesgo hasta agua de muy alto riesgo para la salud de los consumidores.
- E.** El método SODIS si puede ser aplicado como un método alternativo de desinfección de agua contaminada en fuentes naturales en San Juan Sacatepéquez, Guatemala.
- F.** El método SODIS redujo considerablemente la carga de bacterias del grupo coliforme y *E. coli* en las muestras de agua utilizadas para consumo humano en San Juan Sacatepéquez, exponiendo las botellas por 8 horas a la radiación solar ($p=0.00001$).
- G.** De acuerdo a los criterios de la OMS para la clasificación de fuentes de agua para consumo humano, el método SODIS si mejora la calidad sanitaria del agua con contaminación fecal en San Juan Sacatepéquez.

X. RECOMENDACIONES

- A.** Realizar estudios de la eficiencia del método SODIS de acuerdo a las zonas climáticas de la República de Guatemala, en las áreas en las cuales la calidad sanitaria de las aguas para consumo humano no cumplan con las normas establecidas por las leyes vigentes o las recomendaciones de la OMS y en las que los usuarios no tengan las posibilidades económicas de sostener o utilizar métodos tradicionales como la clorificación, de tal forma que en los lugares en los cuales el método se introduzca se cuente con una base científica para su aplicación y máxima efectividad.
- B.** Efectuar estudios sobre la aplicación de SODIS en los meses de verano (marzo a junio) en los cuales la radiación UV sobre la superficie de la tierra aumenta.
- C.** Realizar investigaciones en relación a métodos alternativos para la desinfección de agua que puedan combinarse con el método SODIS en las épocas lluviosas o de baja radiación UV.
- D.** Realizar estudios sobre la recuperación de las funciones biológicas de los microorganismos para determinar el tiempo de seguridad para el consumo de aguas tratadas con SODIS, especialmente de microorganismos patógenos.
- E.** Promover el método SODIS como un método alternativo en condiciones de desastres a nivel nacional que permita a la población obtener agua sanitariamente segura.
- F.** Promover el método de desinfección solar SODIS en las áreas en las cuales los métodos caseros como el calentamiento del agua utilizando leña no solamente dañan el medio ambiente sino también es costoso, obligando a las personas a consumir agua no tratada, lo cual aumenta la probabilidad de enfermedades gastrointestinales y la mortalidad, principalmente infantil.

XI. REFERENCIAS

1. Miyares, MR. Determinación de coliformes y helmintos en aguas afluentes y efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales, Nimajuyú 1 zona 21. Guatemala: Universidad de San Carlos, (tesis de graduación, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia) 2003. 66p.
2. Down SE. *et al.* Confirmed detection of *Cyclospora cayetanesis*, *Encephalitozoon intestinalis* and *Cryptosporidium parvum* in water used for drinking. *J Water Health* 01 2003; 1:117-123.
3. Estrada WA. Relación entre la presencia de colifagos y *Escherichia coli* en diferentes fuentes de agua de la ciudad capital, y análisis por asociación de la contaminación viral de las mismas. Guatemala: Universidad de San Carlos, (tesis de graduación, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia) 2001. 47p.
4. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. “Evaluación de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento 2000 en las Américas.” 13 mar 2004. 01 may 08. disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org>
5. Armas, JF. Cuantificación de coliformes y determinación de *Salmonella* en pescados del lago de Amatitlán. Guatemala: Universidad de San Carlos, (tesis de graduación, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia) 1998. 52p.
6. Gil IP. Monitoreo y cuantificación de coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli*, en siete micro cuencas del lago de Amatitlán: Chanquin, El Frutal, Guadrón, Pinula, San Lucas, Zacatal y Zanjón la Palín. Guatemala: Universidad de San Carlos, (tesis de graduación, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia) 2001. 46p.
7. López MC. Efecto del color y la turbiedad en la eliminación de coliformes fecales al aplicar el método de desinfección solar en agua cruda proveniente de los vertederos de Acatán, Teocinte 18” y Canalitos de la planta potabilizadora Santa Lucia de la Ciudad de Guatemala. Guatemala: Universidad de San Carlos, (tesis de maestría, Facultad de Ingeniería) 2002. 57p.
8. Coordinación de Vigilancia Epidemiológica. Boletín Epidemiológico Nacional. Guatemala: Ministerio de Salud, 2003. 76p.
9. Quan NE. Uso de la radiación solar para la desinfección de agua contaminada con el agente causal del cólera. Guatemala: Universidad de San Carlos, (tesis de graduación, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia) 1994. 64p.
10. Understanding children’s work “Entendiendo el trabajo infantil en Guatemala”. Organización mundial del trabajo. Sep 2003. 03 may 2008. disponible en: <http://www.ilo.org/ipec/index.htm>
11. Meierhofer R., Wegelin M. “Desinfección Solar del Agua: Guía de Aplicación”. Bolivia. Fundación Sodis. Jun 2003. 03 may 2008. disponible en: <http://www.wsp.org/file/pubs/sodis.pdf>
12. Solar Water Disinfection: a guide for the application of SODIS. Duebendorf: Water and Sanitation in Developing Countries and Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology; Doc. Tec. 2002. 55p + XXI.

13. Brunner M., Grimm B., Schmidt J. "Bottles in the Sun: solar water disinfection in Central Asia". Joint Development Associates. Ed. Dic 2001.Uzbekistan. 03 may 2008. disponible en: http://www.sodis.ch/files/MaterialsJDA/Report_2001_e.pdf
14. McGuilan KG. *et al.* Solar disinfection of drinking water contained in transparent plastic bottles: characterizing the bacterial inactivation process. *Appl. Environ. Microbiol* 1998; 84:1138-1148.
15. Rijal GK., Fujioka RS. Synergistic effect of solar radiation and solar heating to disinfect drinking water sources. *Water Sci Technol* 2001; 43:155-162.
16. Rijal GK., Fujioka RS. Use of reflectors to enhance the synergistic effects of solar heating and solar wavelengths to disinfect drinking water sources. *Water Sci Technol* 2003; 48:481-488.
17. Sodis. "Technical Note # 4; materials: bottles versus bags". Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 03 may 08. disponible en: <http://www.sodis.ch/files/note4.pdf>
18. Herrera AG *et al.* "Desinfección solar, una alternativa para pequeñas comunidades rurales." *Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua: Agua potable para comunidades rurales* (2003). 04 may 2008. disponible en: <http://www.tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda>
19. Wegelin M. *et al.* Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. *JWater SRT-Aqua*. 1994; 43:154-169.
20. Joyce TM., McGuigan KG., Elmore-Meegan M., Conroy RM. Inactivation of fecal bacteria in drinking water by solar heating. *Appl. Environ. Microbiol* 1996; 62:399-402.
21. Sommer B. *et al.* SODIS-an emerging water treatment process. *J Water SRT- Aqua* 1997; 46:127-137.
22. Cortez JE *et al.* "Inactivación y recuperación de enterobacterias en agua de consumo humano tratada con radiación solar." *Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua: Agua potable para comunidades rurales* (2003). 04 may 2008. disponible en : <http://www.tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda>
23. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. SODIS News 1999; 4:3-14.
24. Reed RH., Mani SK., Meyer V. Solar photo-oxidative disinfection of drinking water: preliminary field observations. *Letters in Applied Microbiology* 2000; 30:432-436.
25. Smith RJ., Kehoe SC., McGuigan KG., Barer MR. Effects of simulated solar disinfection of water on infectivity of *Salmonella typhimurium*. *Letters in Applied Microbiology* 2000; 31:284-288.
26. Walker DC., Len SV., Sheehan B. Development and evaluation of a reflective solar disinfection pouch for treatment of drinking water. *Appl. Environ. Microbiol* 2004; 70:2545-2550.
27. Vidal A., Díaz AI. High-performance, low-cost solar collectors for disinfection of contaminated water. *Water Environ Res* 2000; 72:271-276.
28. Oates PM., Shanahan P., Polz MF. Solar disinfection (SODIS): simulation of solar radiation for global assessment and application for point-of-use water treatment in Haiti. *Water Res* 2003; 37:47-54.
29. Tercer taller internacional de promoción de SODIS en Ecuador, Guatemala, Perú, Honduras y Nicaragua: SODIS comienza su reto. Cochabamba, Bolivia: Fundación SODIS, Doc. Tec. 2001. (p.2-3).

30. Reller ME. *et al.* A randomized controlled trial of household-based flocculant-disinfectant drinking water treatment for diarrhea prevention in rural Guatemala. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 2003; 69:411-419.
31. Organización Mundial de la Salud. Lucha contra las enfermedades transmitidas por el agua en los hogares 2007. 04 may 2008. disponible en:
<http://www.who.int/household_water/advocacy/combating_disease_es.pdf>
32. Castro R, ed. La calidad del agua potable en América Latina: ponderación de los riesgos microbiológicos contra los riesgos de los subproductos de la desinfección química. Estados Unidos de América: Organización Panamericana de la Salud, 1996. XIII+222p.
33. World Health Organization. “Guidelines for Drinking-Water Quality: Recommendations”. Geneva. 3ed. Vols. 3, vol. 1, 2004. 01 may 2008. disponible en:
<http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3sp.pdf>
34. World Health Organization. “Guidelines for Drinking-Water Quality: Recommendations”. Geneva. 2ed. Vols. 3, vol. 1, 1996. 05 may 2008. disponible en:
<http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq2v1/en/print.html>
35. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. “Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades: tecnología de pequeños sistemas de abastecimiento de agua en países en desarrollo: desinfección” (1998) 05 may 2008. disponible en:
<<http://www.cepis.ops-oms.org>>
36. World Health Organization. Emerging Issues in Water and Infectious disease. Francia: Doc Tec. 2003.15p.
37. Mondaca MA., “Riesgo de enfermedades transmitidas por el agua en zonas rurales.” *Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua: Agua potable para comunidades rurales* (2003). 06 may 2008. disponible en: <<http://www.tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda>>
38. Witt VM., Reiff FM. “La desinfección del agua a nivel casero en zonas urbanas marginales y rurales”. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. may 1993. 06 may 2008. disponible en: <<http://www.cepis.ops-oms.org>>
39. Organización mundial de la salud. Agua, saneamiento y salud ; hojas informativas sobre enfermedades relacionadas con el agua. 06 may 2008. disponible en :
<http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/diseasefact/es/index.html>
40. Campos C., “Indicadores de contaminación fecal en aguas.” *Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua: Agua potable para comunidades rurales* (2003). 06 may 2008. disponible en: <<http://www.tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda>>
41. Adams BL., Bates TC., Oliver JD. Survival of *Helicobacter pylori* in a natural freshwater environment. *Applied and Environmental Microbiology* 2003; 69:7462-7466.
42. Guidelines for safe recreational water environments:coastal and fresh waters. Geneva: World Health Organization, Doc Tec. 2003. XIX+220p.

43. World Health Organization. Relationships between common water bacteria and pathogens in drinking-water 2003. 12 may 08. disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/HPC6.pdf
44. World Health Organization. Guidelines for Drinking-Water Quality: drinking-water quality control in small-community supplies. Geneva. 2ed. Vols. 3, vol. 2, 1996. 07 may 2008. disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq2v1/en/index2.html
45. Health-Based Monitoring of Recreational Waters: the Feasibility of a new approach (the “Annapolis Protocol”). Geneva: World Health Organization, Doc Tec. 1999.46p.
46. World Health Organization. “Water-related diseases”. 2004. 08 may 2008. disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/en
47. Jawetz E., Melnick JL., Adelberg EA. Manual de Microbiología Médica. 9 ed. México: Editorial El Manual Moderno, 1981. 595p.
48. Maya C., Beltrán N., Jimenez B., Bonilla P. Evaluation of the UV Disinfection Process in Bacteria and Amphizoic Amoebae Inactivation. Water Science and Technology 2003; 3:285–291.
49. Moss MO., Adams MR. Microbiología de los Alimentos. España: The Royal Society of Chemistry, 1995. XIII+464p.
50. Clesceri LS., Greenberg AE., Eaton AD. eds. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20 ed. Washington, DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 1998. XXXVII+10-161p.
51. Norma guatemalteca obligatoria COGUANOR NGO 29 001:99 1ra revisión. Guatemala: Ministerio de Economía, Doc. Tec. 1999. 14p.
52. Edberg SC., Allen MJ., Smith DB., Kriz NJ. Enumeration of total coliforms and *Escherichia coli* from source water by the defined substrate technology. Applied and Environmental Microbiology 1990; 56:366-369.
53. Jimenez MA. *et al.* Teschoviruses as indicators of porcine fecal contamination of surface water. Applied and Environmental Microbiology 2003; 69:6311-6315.
54. Hunter PR. Drinking water and diarrhoeal disease due to *Escherichia coli*. J Water Health 2003; 65-72.
55. Pascual MR., Microbiología Alimentaria: metodología analítica para alimentos y bebidas. España: Diaz Santos, 1992. XXII+357p.
56. Department of Protection of the Human Environment. “Heterotrophic Plate Count Measurement in Drinking Water Safety Management”. World Health Organization. 2002. 10 may 2008. disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/en/WSH02.10.pdf
57. Bartram J. *et al.* Heterotrophic plate counts and drinking-water safety: The significance of HPCs for water quality and the human health. World Health Organization 2003. disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/HPC6.pdf
58. Cole D., Long SC., Sobsey MD. Evaluation of F + RNA and DNA coliphages as source-specific indicators of fecal contamination in surface waters. Applied and Environmental Microbiology 2003; 69:6507-6514.

59. De Motes CM *et al.* Detection of bovine and porcine Adenoviruses for tracing the source of fecal contamination. *Applied and Environmental Microbiology* 2004; 70:1448-1454.
60. World Health Organization. "Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 Report". 11 may 2008. disponible en:
<http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/globalassess/en/>
61. Vargas, R. eds. "Sistema de Desinfección del Agua y Alimentos al Nivel Domiciliario." Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del ambiente. Organización Mundial de la Salud. 11 may 2008. disponible en: <<http://www.cepis.ops-oms.org/metaia/search/php>>
62. Macy J., Quick R. "El Sistema de Agua Segura: Intervención de Calidad Del Agua en el Hogar para Países en Vías de Desarrollo". 11 may 2008. disponible en:
<<http://www.agualatinoamerica.cum/docs/PDF/7-8-02macy.pdf>>
63. Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades CDC (ED) Home Page. "Safe water systems for the developing: A handbook for implementing household basal water treatment and safe storage projects" 27 mar 2002. 11 may 2008. disponible en:
<http://www.cdc.gov/safewater/manual/sns_Manual.pdf>
64. Pavón TB *et al.* "Experiencias en la evaluación de un sistema de potabilización aplicado a comunidades rurales con sedimentación por manto de lodo." *Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua: Agua potable para comunidades rurales* (2003). 12 may 2008. disponible en:<
<http://www.tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda.>>
65. Caslake LF *et al.* Disinfection of contaminated water by using solar irradiation. *Applied and Environmental Microbiology* 2004; 170:1145-1151.
66. Souter PF., Evaluation of a new water treatment for point-of-use household applications to remove microorganisms and arsenic from drinking water. *J Water Health* 2003:73-84.
67. Guerra, C. "Ponderación de los Riesgos de Origen Microbiano y Químico en la Desinfección del Agua Potable: la perspectiva panamericana." *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Organización Mundial de la Salud.* 19 mar 2002. 12 may 2008. disponible en:
<<http://www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/repind55/ponrie/pon.html>>
68. Pulido DG *et al.* "Agua potable para pequeñas comunidades rurales a través de un sistema de colección y almacenamiento de lluvia y planta potabilizadora." *Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua: Agua potable para comunidades rurales* (2003). 12 may 2008. disponible en:<
<http://www.tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda.>>
69. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. "La desinfección del agua en el hogar para la prevención del cólera." 1998. 13 may 2008. disponible en:
<<http://www.cepis.ops-oms.org>>
70. Instituto Nacional de Estadística, Guatemala Home Page. 30 ene 2004. Censos Nacionales de Habitación y Población. 13 may 2008. disponible en: <<http://www.ine.gob.gt/index>>

71. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. “Evaluación de los servicios de agua potable y saneamiento 2000 en las Américas: Guatemala.” 13 mar 2004. 13 may 2008. disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/eva2000/Guatemala/informe.html>>
72. Organización Panamericana de la Salud. “Datos básicos de cobertura en agua potable y saneamiento para la región de las Américas: Guatemala” 17 abr 2007. 05 may 2008. Disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org/AyS2004/paises/guatemala/guatemala.html>
73. Coordinación de Vigilancia Epidemiológica. Boletín Epidemiológico Nacional. Guatemala: Ministerio de Salud, 2002. 67p.
74. Rangel JM *et al.* A novel technology to improve drinking water quality: a microbiological evaluation of in-home flocculation and chlorination in rural Guatemala. *J Water Health* 2003:15-22.
75. Centers diseases for control and prevention. Household water treatment options in developing countries: solar disinfection (SODIS) 2008. disponible en: http://www.ehproject.org/PDF/ehkm/cdc-options_sodis.pdf>
76. Fuentes D., Rivera K. “Soluciones Innovadoras para el Suministro de Agua en Comunidades Rurales Dispersas en Honduras”. Sep 2003. *Programa de Agua y Saneamiento América Latina y el Caribe*. 15 may 2008. disponible en: <http://www.wsp.org/filez/pubs/soluciones.pdf>>
77. Sodis. “*Technical Note # 1; Sodis in Brief*”. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 15 may 2008. disponible en: <http://www.sodis.ch/files/note1.pdf>.
78. Sommer B. *et al.* SODIS-an emerging water treatment process. *J Water SRT- Aqua* 1997;127-137, Vol 46, No.3.
79. Conroy RM *et al.* Solar disinfection of water reduces diarrhoea disease: an update. *Arch Dis Child* 1999;81:337-338.
80. Conroy RM *et al.* Solar disinfection of drinking water protects against cholera in children under 6 years of age. *Arch dis Child* 2001;85:293-295.
81. Sodis. “*Technical Note # 5; climatic conditions: solar radiation*”. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 15 may 2008. disponible en: <http://www.sodis.ch/files/note5.pdf>.
82. Sodis. “*Technical Note # 9; Sodis efficiency: the process*”. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 15 may 2008. disponible en: <http://www.sodis.ch/files/note9.pdf>.
83. Sinton LW., Hall CH., Lynch PA., Davies-Colley RJ. Sunlight inactivation of fecal indicator bacteria and bacteriophages from waste stabilization pond effluent in fresh and saline waters. *Lett Appl Microbiol* 2002; 68:1122-1131.
84. Sodis. “*Technical Note # 11; Sodis efficiency: covered sky condition*”. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 15 may 2008. disponible en: <http://www.sodis.ch/files/note11.pdf>.

85. Solarte, Y. *et al.* “Uso de la Radiación Solar (UV-A y Temperatura) en la inactivación del *Vibrio cholerae* en agua para consumo humano: factores que condicionan la eficiencia del proceso.” Colombia Médica 1997; 28:123-129. disponible en:
<<http://colombiamedica.univalle.edu.co/Vol28No3/radiacion.html>>
86. Efecto del método SODIS sobre los parásitos en tres regiones de Bolivia (Quistes de *Giardia lamblia* y ovoquistes de *Cryptosporidium parvum*). Cochabamba, Bolivia: Fundación SODIS para América Latina, Doc. Tec. 2003. (p.9-10).
87. Berney M. Efficacy of solar disinfection of *Escherichia coli*, *Shigella Flexneri*, *Salmonella typhimurium* and *Vibrio cholera*. *Journal of Applied Microbiology* 2006; 101: 828-836.
88. Heaselgrave W. *et al.* Solar disinfection of poliovirus and *Acanthamoeba polyphaga* cysts in water-a laboratory study using simulated sunlight. *Lett Appl Microbiology* 2006;43: 125-30.
89. Boyle M. *et al.* Bactericidal effect of solar water disinfection under real sunlight conditions. *Appl Environ Microbiol* 2008;74(10):2997-3001.
90. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. “Water disinfection by solar energy”. 1998. 15 may 2008. disponible en: <<http://www.cepis.ops-oms.org>>
91. Sodis. “*Sodis-Water quality improvement at household level: A case example from Guatemala*”. 15 may 2008. disponible en <<http://www.sodis.ch>>.
92. Mendoza MG. Desinfección de agua de bebida a través de su exposición a los rayos solares. Guatemala: Universidad de San Carlos, (tesis de graduación, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia) 1992. 79p.
93. La botella ideal para SODIS. SODIS; una buena elección. Cochabamba, Bolivia: Fundación SODIS, Doc Tec. No.2, 2001. (p.5-6).
94. SODIS: desinfección solar del agua. Cochabamba, Bolivia: Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental, Doc. Tec. 4p.
95. SODIS: desinfección solar del agua. Bolivia: UNICEF-PROANDES, Doc. Tec. 2000. 13p.
96. Sodis. “*Technical Note # 6; climatic conditions: seasonal effects and weather changes*”. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 16 may 2008. disponible en: <<http://www.sodis.ch/files/note6.pdf>>.
97. Cascales MA. “*La paradoja de la aerobiosis*”. *Real. Academia de Las Ciencias Veterinarias*. 26 ene 2005. 15 may 2005. disponible en: <<http://www.racve.es/actividades/aerobiosis%20Cascales.htm>>
98. Venereo JR. “Daño oxidativo, radicales libres y antioxidantes”. *Rev cub Med Mil*; 31:126-133. disponible en:
<http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S013865572002000200009&lng=es&nrm=iso>
99. Schoenen D., Kolch A. Photoreactivation of *E. coli* depending on light intensity after UV irradiation. *Zentralbl Hyg Umweltmed* 1992; 192:565-570.
100. Berney M. Flow-cytometric study of vital cellular functions in *Escherichia coli* during solar disinfection (SODIS). *Microbiology* 2006; 152:1719-1729.

101. Kehoe SC., Barer MR., Devlin LO., McGuigan KG. Batch process solar disinfection is an efficient means of disinfecting drinking water contaminated with *Shigella dysenteriae* type I. Lett Appl Microbiol 2004; 38:410-414.
102. Sodis. "Technical Note # 2; materials: plastic versus glass bottles". Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 16 may 2008. disponible en:
<http://www.sodis.ch/files/note2.pdf>.
103. Sodis. "Technical Note # 3; materials: ageing effects on PET bottles". Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 16 may 2008. disponible en:
<http://www.sodis.ch/files/note3.pdf>.
104. Sodis. "Technical Note # 7; water quality: turbidity and water depth". Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 16 may 2008. disponible en:
<http://www.sodis.ch/files/note7.pdf>.
105. Sodis. "Technical Note # 10; Sodis efficiency: influence of turbidity". Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 16 may 2008. disponible en
<http://www.sodis.ch/files/note10.pdf>.
106. Sodis. "Technical Note # 8; water quality: oxygen concentration". Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 16 may 2008. disponible en
<http://www.sodis.ch/files/note8.pdf>.
107. Reed RH., Oxygen and photoinactivation of *Escherichia coli* in UVA and sunlight Journal of Applied Microbiology 2005; 99:39-50.
108. Reed RH., Sunshine and fresh air: A practical approach to combating water-borne disease. Waterlines 1997; 15:27-29.
109. Reed RH. Solar inactivation of faecal bacteria in water: the critical role of oxygen. Lett Appl Microbiol 1997; 24:276-280.
110. Sodis. "Technical Note # 12; Sodis efficiency: laboratory versus field condition". Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 16 may 2008, disponible en:
<http://www.sodis.ch/files/note12.pdf>.
111. Sodis. "Technical Note # 15; Sodis use: acceptance". Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 16 may 2008, disponible en:<http://www.sodis.ch/files/note15.pdf>.
112. Sodis. "Technical Note # 14; Sodis efficiency: guidelines to increase efficiency". Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 16 may 2008, disponible en:
<http://www.sodis.ch/files/note14.pdf>.
113. Sodis. "Technical Note # 13; Sodis use: application procedure". Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 5 mar 2004. disponible en:
<http://www.sodis.ch/files/note13.pdf>.
114. Fisher MB. Speeding up solar disinfection (SODIS): effects of hydrogen peroxide, temperature, ph and copper plus ascorbate on the photoinactivation of *E. coli*. J Water Health 2008; 6(1):35-51.

115. Sodis. "*Technical Note # 16; Sodis use: costs*". Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. 17 may 2008. disponible en: <http://www.sodis.ch/files/note16.pdf>.
116. IDEXX *Home Page*. 2002. 16 may 2008. disponible en: <http://www.idexx.com>
117. Sodis. "*Sodis-Water quality improvement at household level: A case example from Ecuador*". 16 may 2008. disponible en <http://www.fundacionsodis.org>.
118. Sodis. "*Sodis-Water quality improvement at household level: A case example from Bolivia*". 16 may 2008. disponible en <http://www.fundacionsodis.org>.
119. Sodis. "*Sodis-Water quality improvement at household level: A case example from Peru*". 16 may 2008. disponible en <http://www.fundacionsodis.org>.

XII. ANEXOS

Anexo No. 1

Características de agentes patógenos procedentes de heces transportadas por aguas residuales que contaminan el agua*

Agentes patógenos	Cantidad excretada por persona infectada/g/heces	Máxima supervivencia en el agua (días)	Dosis infectante**
<i>Escherichia coli</i> enteropatógena	10 ⁸	90	10 ² -10 ⁹
<i>Salmonella spp.</i>	10 ⁶	60-90	10 ⁷
<i>Shigella spp.</i>	10 ⁶	30	10 ²
<i>Campylobacter sp.</i>	10 ⁷	7	10 ⁶
<i>Vibrio cholerae</i>	10 ⁶	30	10 ⁸
<i>Yersinia enterocolitica</i>	10 ⁵	90	10 ⁹
<i>Aeromonas sp.</i>	-	90	10 ⁸
<i>Leptospira sp.</i>	-	-	3
Virus de la Hepatitis A	10 ⁶	5-27	1-10
Rotavirus	10 ⁶	5-27	1-10
<i>Entamoeba histolytica</i>	10 ⁷	25	10-100
<i>Giardia lamblia</i>	10 ⁵	25	1-10
<i>Ascaris lumbricoides</i>	10 ³	365	2-5
<i>Taenia sp.</i>	10 ³	270	1
Enterovirus (Polio I)	10 ⁷	8 ⁺ /15 ⁺⁺	1-72
Enterovirus (Polio II)	10 ⁷	8 ⁺ /8 ⁺⁺	1-72
Enterovirus (Polio III)	10 ⁷	8 ⁺ /8 ⁺⁺	1-72
ECHO 6		15 ⁺ /8 ⁺⁺	
Coxsackie virus		2 ⁺ /2 ⁺⁺	

**Dosis infectiva que provoca síntomas clínicos en la mitad de los individuos examinados

+ En agua de mar; ++ En agua de ríos.

* Fuente: Geldreich, E. E. and D. J. Reasoner (1990). Home Treatment Devices and Water Quality. In: Drinking Water Microbiology: Progress and Recent Developments. G. A. McFeters. (ed.) New York, Springer-Verlag: 147-167.

Anexo No. 2

Principales agentes infecciosos aislados en agua utilizada para consumo humano en el mundo*

Bacterias	Virus	Protozoos	Helminos
<i>Campylobacter jejuni</i>	Adenovirus	<i>Balantidium coli</i>	<i>Ancylostoma duodenale</i>
<i>Escherichia coli</i> enteropatógena	Enterovirus	<i>Entamoeba histolytica</i>	<i>Ascaris lumbricoides</i>
<i>Salmonella</i> spp.	Hepatitis A	<i>Giardia lamblia</i>	<i>Echinococcus granulosus</i>
<i>Shigella</i> spp.	Agente Norwalk	<i>Cryptosporidium</i>	<i>Necator americanus</i>
<i>Vibrio cholerae</i>	Reovirus		<i>Fasciolopsis buski</i>
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Virus Coxsackie		<i>Strongyloides stercoralis</i>
	Rotavirus		<i>Taenia solium</i>
			<i>Trichuris trichiura</i>

* Fuente: World Health Organization "Guidelines for Drinking-Water Quality: Recommendations", 2004 (33).

Anexo No. 3

Agentes patógenos presentes en el agua que se transmiten por vía oral y su importancia para el abastecimiento*

Microorganismos Patógeno	Importancia para la salud	Resistencia al cloro ⁽¹⁾	Reservorio animal importante
<i>Burkholderia pseudomallei</i>	Alta	Baja	No
<i>Campylobacter jejuni</i> , <i>C. coli</i>	Considerable	Baja	Si
<i>E. coli</i> enteropatógena	Considerable	Baja	Si
<i>Salmonella Typhi</i>	Considerable	Baja	No
Otras salmoneras	Considerable	Baja	Si
<i>Shigella</i> spp.	Considerable	Baja	No
<i>Vibrio cholerae</i>	Considerable	Baja	No
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Considerable	Baja	Si
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Moderada	Moderada	No
<i>Aeromonas</i> spp.	Moderada	Baja	No
Adenovirus	Considerable	Moderada	No
Enterovirus	Considerable	Moderada	No
Norovirus	Alta	Moderada	Potencial
Sapovirus	Alta	Moderada	Potencial
Virus de Hepatitis A	Considerable	Moderada	No
Virus de Norwalk	Considerable	No confirmado	No
Rotavirus	Considerable	No confirmado	No
<i>Entamoeba histolytica</i>	Considerable	Alta	No
<i>Giardia lamblia</i>	Considerable	Alta	Si
<i>Cryptosporidium parvum</i>	Considerable	Alta	Si
<i>Dracunculus medinensis</i>	Considerable	Moderada	Si

(1) Cuando la fase infecciosa se encuentra en estado libre en el agua tratada con dosis y tiempos de contacto tradicionales. Resistencia moderada, el agente puede no quedar completamente destruido; resistencia baja, el agente queda completamente destruido.

* Fuente: World Health Organization "Guidelines for Drinking-Water Quality: Recommendations", 2004 (33).

Anexo No. 4

Resistencia térmica de los microorganismos en relación al tiempo de exposición*

Microorganismo	Temperaturas en °C para una inactivación del 100 %		
	1 minuto	6 minutos	60 minutos
Enterovirus			62
Rotavirus		63 por 30 min.	
Coliformes Fecales		80 destrucción completa	
<i>Salmonella</i> spp.		62	58
<i>Shigella</i> spp.		61	54
<i>Vibrio cholerae</i>			45
Quistes de <i>Entamoeba histolytica</i>	57	54	50
Quistes de <i>Giardia lamblia</i>	57	54	50
Huevos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	68	62	57
Huevos de <i>Taenia</i> sp.	65	57	51

*Fuente: Meierhofer R., Wegelin M.: Desinfección Solar del Agua: Guía de Aplicación, 2003(11).

Anexo No. 5

Análisis de aguas por el método Colilert® de IDEXX® en bandejas de 97 pozos para la cuantificación de coliformes totales y *Escherichia coli* *



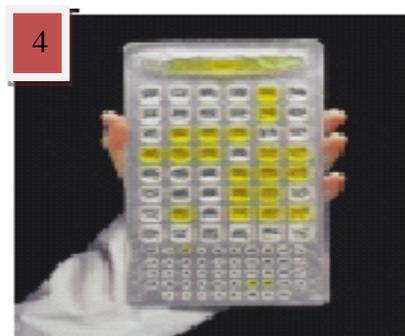
Vaciar el contenido de un sobre con el reactivo Colilert en el envase plástico con 100 ml. de muestra.



Luego de agitar el envase plástico vaciar la muestra en la bandeja plástica de 97 pozos



Colocar la bandeja de forma apropiada sobre la base de hule y luego pasarla a través del sellador Quany Tray® 2000

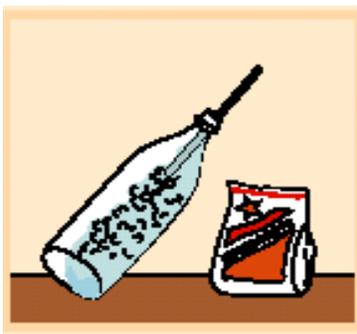


Incubar las bandejas por 24-28 horas a 35°C y contar el número de pozos amarillos y con fluorescencia.

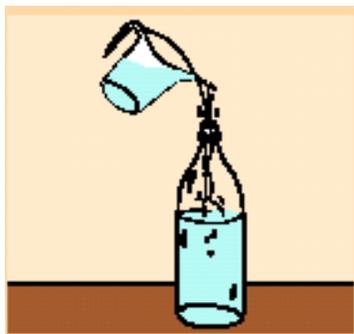
*Fuente: IDEXX Home Page (116).

Anexo No. 6

Proceso de aplicación del método de desinfección solar de agua SODIS*



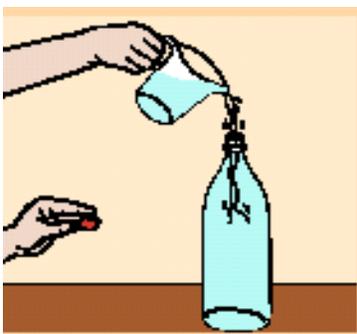
Lavar la botella con agua y jabón al utilizarla por primera vez



Llenar $\frac{3}{4}$ de la botella con agua



Agitar la botella aproximadamente por 20 segundos



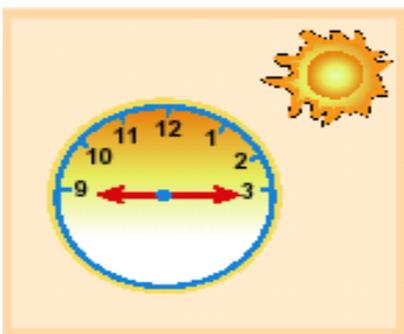
Luego llenar la botella completamente, cuidando de que la profundidad no sea mayor a 10 cm. y por último cerrar bien la botella.



Colocar las botellas expuestas directamente a la luz solar, preferentemente sobre una lámina.



También se puede colocar sobre el techo de la casa en un lugar accesible



Exponer las botellas al sol en las horas de más intensidad, por un mínimo de 6 horas

Luego, el agua está lista para el consumo.

Anexo No. 7
Marco muestral⁽¹⁾

PRIMERA ETAPA⁽²⁾

	COMUNIDAD I		COMUNIDAD II		COMUNIDAD III						TOTAL					
	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8	PUNTO 9							
1		11	21	Q + M	31		41		51		61	Q + M	71	Q + M	81	
2		12	22		32		42		52		62		72	Q + M	82	
3	Q + M	13	23		33		43		53		63		73		83	
4		14	24		34		44		54		64		74		84	Q + M
5		15	25	Q + M	35		45		55	Q + M	65		75		85	
6		16	26		36		46		56		66	Q + M	76		86	Q + M
7		17	Q + M	27		37		47	Q + M	57		67		77		87
8		18	28		38	Q + M	48		58		68		78		88	
9	Q + M	19	29		39		49		59		69		79		89	
10		20	30		40	Q + M	50		60		70		80	Q + M	90	
SUMATORIA	2	1	2		2	1	1	2	3	2						16

SEGUNDA ETAPA⁽³⁾

	COMUNIDAD I		COMUNIDAD II		COMUNIDAD III						TOTAL						
	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8	PUNTO 9								
91		101	111	SODIS + M	121		131		141		151		161		171		
92		102	112		122		132		142		152		162		172	SODIS + M	
93		103	113		123		133	SODIS + M	143	SODIS + M	153		163		173		
94		104	114		124		134	SODIS + M	144		154	SODIS + M	164		174		
95		105	115	SODIS + M	125		135		145		155	SODIS + M	165		175		
96		106	116		126	SODIS + M	136		146		156		166		176		
97		107	SODIS + M	117		127		137		147		157		167	SODIS + M	177	
98	SODIS + M	108		SODIS + M	128		138		148		158		168	SODIS + M	178		
99		109	119		129		139		149		159		169	SODIS + M	179		
100		110	SODIS + M	120	SODIS + M	130	SODIS + M	140	SODIS + M	150		160		170		180	SODIS + M
SUMATORIA	1	2	4		2	3	1	2	3	2						20	

(1) Para realizar la elección al azar de 36 muestras que representan el 20% de 180 puntos muestrales se utilizó la herramienta de análisis estadístico “muestreo” del programa Excel® de Microsoft XP®.

(2) **Primera etapa (Q+M):** Análisis para determinar las características fisicoquímicas que influyen en el método SODIS; y calidad microbiológica del agua en los puntos seleccionados.

(3) **Segunda etapa (SODIS+M):** Análisis microbiológico antes del tratamiento con SODIS, aplicación del método SODIS y análisis microbiológico de las muestras después de la aplicación de SODIS.

Fuente: Datos experimentales.

Anexo No. 8

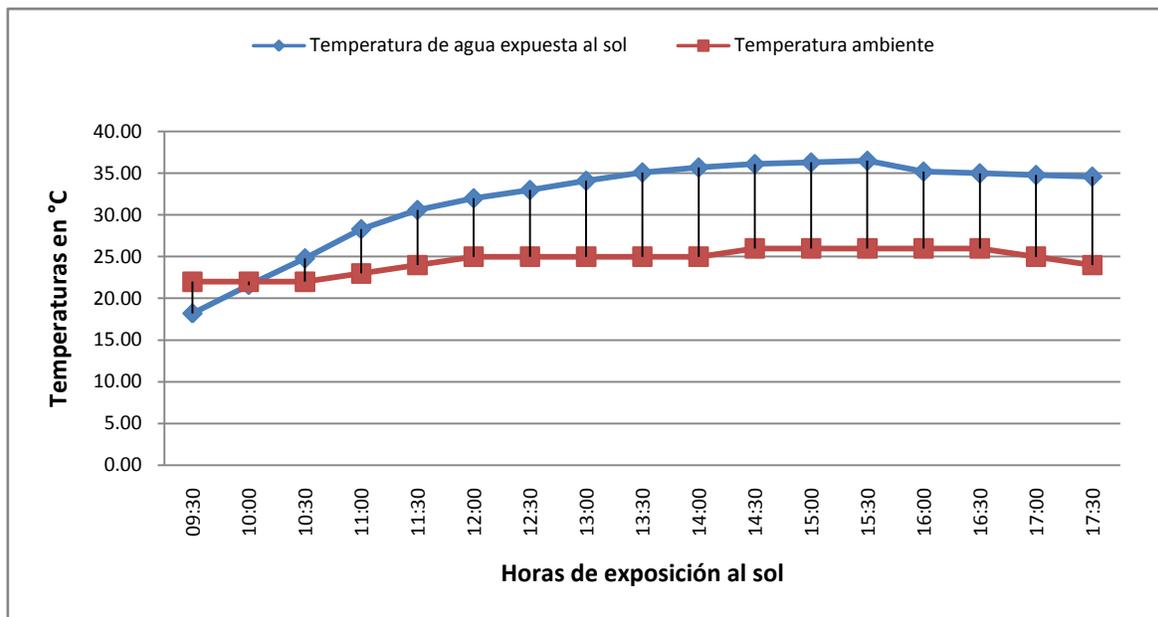
Ubicación y características de las fuentes de aguas naturales seleccionadas en el municipio de San Juan Sacatepéquez, Guatemala

Comunidad	Identificación	Descripción	Ubicación	Características de los puntos de muestreo
I	Pozo 1	Pozo artesanal, 5m. de profundidad, Familia Chin	Km.30.2 camino a San Pedro en San Juan Sacatepéquez	Pozo artesanal cubierto, utiliza bomba sumergible, área de entrada a San Juan Sacatepéquez
I	Pozo 2	Pozo artesanal, 3m. de profundidad, Familia Suruy	Km.30.2 camino a San Pedro en San Juan Sacatepéquez	Pozo artesanal cubierto con láminas, utiliza bomba de trasiego
II	Nacimiento 3	Agua de nacimiento, pileta municipal	Camino a Sajcavillá en San Juan Sacatepéquez	Agua de nacimiento, utilizada para pileta municipal, río de aguas negras a 2 metros de distancia
III	Pozo 4	Pozo artesanal, 5m. de profundidad	Lote 30, sector 3 Las Flores	Pozo artesanal, no cubierto, utilizan cubeta para sacar agua
III	Pozo 5	Pozo artesanal, 15m. de profundidad	Lote 59, Joya de las Flores	Pozo artesanal, cubierto con láminas, utilizan cubeta para sacar agua
III	Pozo 6	Pozo artesanal, 15m. de profundidad	Lote 91, Joya de las Flores	Pozo descubierto, expuesto al ambiente, utilizan cubeta para sacar agua
III	Pozo 7	Pozo artesanal, 3m. de profundidad	Lote 76, Joya de las Flores	Pozo artesanal, bajo techo, pero descubierto, poco profundo
III	Pozo 8	Pozo artesanal, área de siembra, 5m. de profundidad	Lote 75, Joya de las Flores	Pozo artesanal, utilizado para agua de riego, descubierto, sin ninguna protección perimetral. En terreno inclinado
III	Pozo 9	Pozo artesanal, área de siembra, 35 metros de profundidad	Lote 77, Joya de las Flores	Pozo artesanal, bajo techo, para riego. Utilizan bomba sumergible.

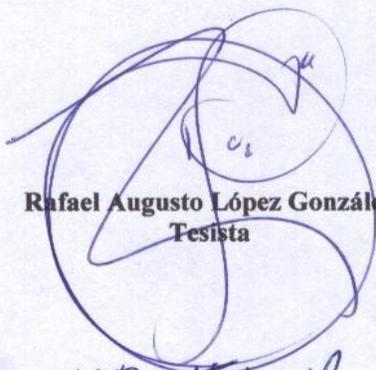
Fuente: Datos experimentales.

Anexo No. 9

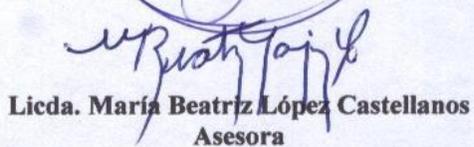
Cambio de temperatura de las muestras de agua expuestas al sol y temperatura ambiente en este estudio, durante el tiempo de exposición de 8 horas a la radiación solar, de acuerdo a las recomendaciones de SODIS



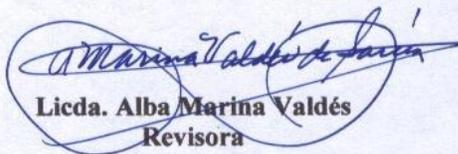
Fuente: Datos experimentales.



Rafael Augusto López González
Tesisista



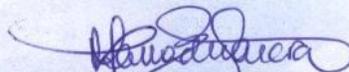
Licda. María Beatriz López Castellanos
Asesora



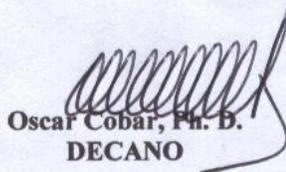
Licda. Alba Marina Valdés
Revisora



Patricia Saravia, Ph. D.
Revisora



Licda. Vivian Matta, M. Sc.
Directora Escuela de Química Biológica



Oscar Cobar, Ph. D.
DECANO