



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

TECNOLOGÍA AMBIENTAL PARA POTABILIZAR AGUA MEDIANTE MÉTODO SODIS
APLICADA EN LA CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN ARQUITECTURA

PRESENTA
VÍCTOR HUGO SÁNCHEZ SIERRA

TUTOR
M. en C. Sergio Alfonso Martínez González
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
M. EN C. ELISEO CANTELLANO DE ROSAS – FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
M. EN ARQ. ARTURO VALERIANO FLORES – FACULTAD DE ARQUITECTURA
M. EN ARQ. JORGE RANGEL DÁVALOS – FACULTAD DE ARQUITECTURA
M. EN ARQ. ERNESTO OCAMPO RUIZ – FACULTAD DE ARQUITECTURA

CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Aquellos que establecen un curso y no pueden ajustar su rumbo
chocarán sobre las rocas de segur, como los que navegan sin
prestar atención a la dirección.*

No podemos cambiar la dirección del viento.

Tampoco podemos darnos el lujo de que sople como queremos.

Actuamos; decidimos; y somos actuados sobre ello.

*Así que es en todas las cosas quiero honrar a aquellos que han
venido antes.*

*Así que es en todas las cosas que deseo preparar el camino para
los que vendrán.*

*Y me recuerdo a mí mismo: En la Fuerza no hay final, sino sólo
comienzos.*

- Oz Ladhod, Poeta de la Corte Real de Onderon

AGRADECIMIENTOS



A la UNAM por haberme dado todo lo que necesito y más. Por alentarme a seguir esforzándome y haber cambiado mi vida para siempre (¿Acaso alguna vez existirá una Casa de Estudios mejor?)



Al Maestro Sergio Martínez (quien es el equilibrio perfecto entre la Ciencia y la Fuerza, y que desde el primer momento fue un honor ser su padawan) por su apoyo y consejo; al Maestro Eliseo Cantellano (por las noches las plantas le cantan suaves melodías) por adentrarme al sorprendente mundo de los humedales y que gracias a él surgió la idea de esta investigación; al Maestro Valeriano (si hubiera más personas como él: calculadores, precisos y organizados, ya habríamos conquistado el Universo) por ser un guía en todo momento; y a los Maestros Ernesto y Jorge (el mejor dúo dinámico de Posgrado) por creer en mi proyecto incluso antes de que yo lo hiciera.



A mis amigos: Escarlett (conoce el lenguaje secreto de la Luna), Gerardo (que ama tanto a la tecnología como a su futura esposa Angy), Giovanni (un ejemplo a seguir para cualquier persona) y Yesenia (el mismo “ángel de los perros”), amigos de añísimos que me han demostrado que con valor y esperanza podemos tocar las estrellas.



A Memo y Nat (quien viven un romance de otra galaxia donde cada día es una nueva aventura), Neri (un gran compañero fiel aderezado con el mejor humor), Fer (no sólo tiene grandes bíceps, sino un corazón aún mayor), Eduardo (aunque parezca frío y distante sabe cómo amar cálidamente a Maricela) y Omar (su música es prolongación de su alma), la familia de amigos que me aceptó para crecer juntos como un equipo. Me han enseñado la importancia de la lealtad y el compromiso.



A mis colegas y amigos de la Facultad de Arquitectura Nashla (frecuentemente olvida que la felicidad está con ella y no delante o atrás, pero sus perritos se lo recuerdan con la misma frecuencia), Ricardo (siempre sabe qué responder tanto en tiempos de paz como de guerra) y Jesús (desconozco si los alumnos lo aman más a él o él a su trabajo), por seguirme en toda esta increíble travesía.



A mis perritas Kira (mi ángel guardián) y Kimy (por ser un perrito jamás comete pecado). Que también son parte de mi familia y me han apoyado cuando ningún otro humano me entiende



A mi familia ¿Qué les puedo decir? Todos son invaluable para mí. Gracias a todos por sus consejos, cariño y buenos momentos compartidos. (Son tan importantes para mí como lo son las sonrisas en la vida).



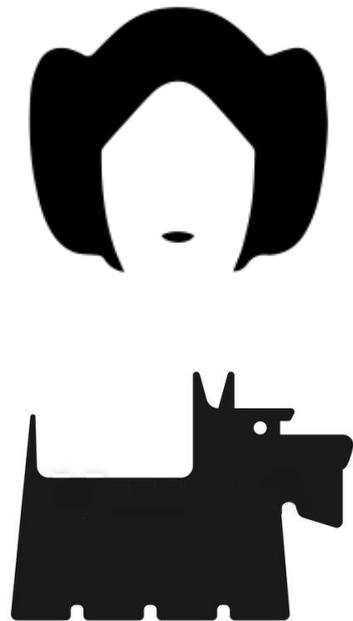
A mis hermanos Omar (un experto en dibujos extraños que hablan y caminan por las noches) y Ángel (sabe muchos idiomas, incluido el de la felicidad): inquietos y futboleros... por enseñarme que no importa lo mal que se vean las cosas, no es el fin del mundo.



A mis padres Julieta (con el tiempo gobernará la Tierra, sólo denle tiempo y verán lo que es capaz de lograr con su compromiso) y Víctor (habla poco, escucha mucho y lee mucho más, así que ha vivido más vidas que cualquiera). Por enseñarme a respetar, valorar y defender a la naturaleza. Por ser mis guías y ejemplos a seguir en todo momento.

Sin ustedes, éste proyecto no hubiera podido ser posible. ¡A todos, muchísimas gracias!

En amada memoria de nuestras princesas Carrie Fisher y Kira



CONTENIDO

VALIDACIÓN DEL PRODUCTO EXPERIMENTAL.....	5
1.1 Valores diferenciales.....	5
1.2 Visión estratégica.....	6
1.3 Objetivos.....	7
1.4 Propuesta del sistema.....	7
1.5 Validación cuantitativa y cualitativa del producto	10
1.6 Umbral de actuación.....	11
1.7 Hipótesis	12
1.8 Diseño de experimento	12
MARCO TEÓRICO	15
2.1 El agua.....	15
2.2 Radiación solar.....	23
2.3 Método SODIS.....	30
EXPERIMENTO	35
3.1 Lugar	35
3.2 Obtención de muestra	36
3.3 Materiales.....	37
ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
4.1 Fase 1	42
4.2 Fase 2	42
4.3 Fase 3	43
4.4 Modelo matemático	44
4.5 Aplicación del modelo matemático	46
CONCLUSIONES	54
5.1 Generales.....	54
5.2 Particulares	55
5.3 Perspectivas de la investigación	56
6. BIBLIOGRAFÍA.....	57
7. APÉNDICES	61
7.1 Material y suministros	61
8. ANEXOS.....	64
8.1 Protocolo de experimentación	64

VALIDACIÓN DEL PRODUCTO EXPERIMENTAL

1.1 Valores diferenciales

El proyecto a desarrollar debe estar normado por propuestas de eficiencia en cuanto a temas arquitectónicos, ingenieriles y salubres; pero todos ellos remarcados en cuanto a leyes de mejora medioambientales (O'Neil, 1979).

Por ello, es necesario precisar las cualidades que la propuesta de proyecto integrará en su invención. Para ello, se clasifican a partir de cuatro áreas, las cuales se describen a continuación:

1.1.1 Arquitectura

Es necesario precisar que la arquitectura se presenta como un área nueva para aplicar el método SODIS; por ello, se propuso generar un dispositivo que permita la reintegración al suministro hidráulico a la arquitectura a manera de una tecnología ambiental pasiva. En otras palabras, una ecotecnología donde se puedan reintroducir las aguas grises y negras como agua potable a las edificaciones.

Como meta primordial es necesario evaluar de manera positiva su funcionalidad todo el año, sin importar los días donde la radiación solar sea menor a la óptima.

Por ello, se buscó que el dispositivo fuera resistente los factores medioambientales a los que estaría expuesto: cambios de temperatura, viento, iluminación y calor solar, lluvia, granizo, y posibles impactos no previstos.

De igual manera, para aplicarse a la arquitectura, se buscó que la tecnología fuera estética, buscando el mejor diseño a emplear; tomando en consideración que la tecnología sería visible.

La adaptación del dispositivo fue otra meta, puesto que está planeado para instalarse en techos o en muros. El primer caso para viviendas unifamiliares y el segundo para plurifamiliares.

Además, se buscó que fuera sencilla de instalar, evitando así el uso de mano de obra especializada y que mayor gente la pueda adquirir sin temor a fallar.

Siendo una tecnología que garantice la íntegra purificación de agua, evidentemente la intención fue buscar la satisfacción total de los usuarios.

1.1.2 Urbanismo

La propuesta consistió en desarrollar el dispositivo adaptable a otro tipo de elementos arquitectónicos con índole urbano, tales como parques, escuelas o centros ecológicos; espacios donde un mayor número de personas pueda conocer esta alternativa de potabilización.

Es así, que la tecnología es económica, evidentemente con el afán de permitirle al público en general la posibilidad de disponer de ella y aplicarla en sus hogares, haciendo de ésta, una herramienta popular.

Partiendo del análisis de radiación solar en México, se ha estudiado la opción de aplicar el dispositivo en la Ciudad de México, y brindar propuestas de emplearlo en los demás estados del país. De igual manera, una meta en la presente investigación es poderla aplicar en diferentes lugares para medir su efectividad.

Siendo así, que la tecnología puede ser controlada por la misma familia o núcleo vecinal, sin que sea necesario emplear grandes marcas, industrias, consorcios o instituciones que estén a cargo, controlando, regulando o limitando el empleo de la tecnología.

1.1.3 Tecnología

Al desarrollar la tecnología ambiental se da seguimiento a la investigación descrita en el Capítulo 2; con la intención de brindar una propuesta para mejorarla y poder llevarla a la adecuación arquitectónica.

Para que el dispositivo que genere un resultado favorable, se utilizó como única fuente de energía la radiación solar; haciendo de este proyecto ambientalmente amigable al usar una fuente de energía renovable y gratuita.

El material empleado en el sistema se eligió por su larga vida (durabilidad), fortaleciendo el ciclo de vida del producto y que éste evite caer en una obsolescencia programada.

1.1.4 Ecología

Al evitar caer en desperdicios y amortiguar el mantenimiento, se promete que el sistema apoye a contrarrestar los efectos del calentamiento global.

Para poder construir la tecnología ambiental se emplearon materiales ya existentes, ello con el fin de aprovechar la energía gastada previamente para la elaboración de los mismos y evitar caer en el consumo de nuevos hidrocarburos para poder producir la materia prima de la tecnología.

De igual manera, los materiales deben ser abundantes en el mercado para evitar traslados excesivos para su manufactura, distribución e intercambio de piezas.

Aunado a ello, las piezas a reparar y agregar deberán ser de fácil adquisición, permitiendo que el mismo usuario tenga accesibilidad de reponer el sistema.

Los filtros previos al ingreso hídrico hacia el dispositivo serán de algodón y carbón activado, materiales de fácil acceso y que representan un mínimo de contaminantes ambientales.

1.2 Visión estratégica

1.2.1 Misión

La tecnología ambiental aplicará el método SODIS (Solar Water Disinfection) como única fuente de energía para potabilizar agua.

1.2.2 Visión

Desarrollar una tecnología ambiental que almacene agua para ser radiada por rayos ultravioleta solares hasta su completa desinfección microbiana, de acuerdo a la NOM 127- SSA1-1994 “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano”

1.2.3 Ideal

Que la arquitectura actual o futura, aplique a su diseño un mecanismo que le permita potabilizar el agua sin necesidad de emplear medios externos y que trabaje de manera ecológica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Demostrar que se puede conseguir una Tecnología Ambiental que reintegre las aguas contaminadas a la arquitectura

1.3.1.1 Objetivos particulares

Utilizar la radiación solar existente en la Ciudad de México como una herramienta constante para potabilizar agua de toma municipal, precipitación pluvial y de humedal sin emplear otro tipo de energía.

Dotar de agua potable a la arquitectura mediante un proyecto ambientalmente amigable y de larga vida.

1.4 Propuesta del sistema

1.4.1 Diseño del sistema

Como premisas para el desarrollo del diseño de la tecnología se tomaron los siguientes aspectos:

- ° Estática: el sistema debe permanecer fijo en el área a colocar, ello como una medida que asegura el dispositivo a una instalación y que evite posibles fallas por mal uso.
- ° Morfología: debe ser un diseño triangular que permita captar la mayor cantidad de radiación ultravioleta en el transcurso del sol en la bóveda celeste con el menor número de sombras generadas por los vértices.
- ° Traslucidez: Se requiere que el material sea translucido para recibir la radiación solar y poder hacer óptimo el método SODIS.

A partir de ello, se desarrolló un sistema cristalino con un primer filtro localizado en la parte superior y en orientación norte (tomado con esta orientación por movimiento de la Tierra con respecto al Sol, a manera de que la sombra del artefacto no oscurezca el agua a purificar). Este filtro será la primera etapa de depuración, funcionando como un tamizador para retirar cualquier tipo de partículas, dejando solamente líquido para su esterilización solar.

La base del sistema será una base recubierta con aluminio que funcionará como un espejo reflejante de los rayos ultravioleta solares. Cabe señalar que se dispondrá de una pendiente mínima donde el agua fluirá para su posterior cosecha.

La pendiente de la base desembocará en una válvula de paso adaptable a llave o prolongación en tubería para su captación en un tanque o ser bebida.

1.4.2 Cantidad de agua

Partiendo de la investigación del Doctor T. Lawand de la Universidad de Montreal, Canadá, (Lawand, 1988, p.3), el método SODIS es efectivo en dosis menores a 12 litros, ello por la manera en que la radiación solar trabaja mejor con la superficie de contacto; y al tratarse de un sistema donde la profundidad hídrica es mayor, los rayos ultravioleta se disipan más y apoyan en menor medida al método.

Es por ello que en una primera etapa se propone la idea de potabilizar dos litros de agua, ello como unidad promedio de consumo por persona al día.

1.4.3 Materiales del sistema

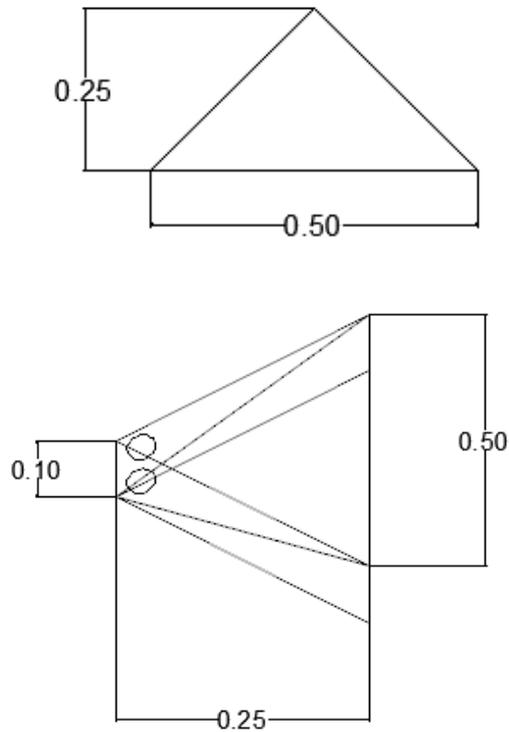
El acrílico con el que se desarrolló el sistema se propuso de acuerdo a los siguientes parámetros:

- El material plástico ha sido aprobado por su calidad y duración para poder permanecer en contacto directo con la intemperie.
- La fácil adquisición, manejo y alteraciones que al material se verá sometido.
- El sencillo montaje y diseño de instalaciones que deberá incluir.
- La eficiencia de radiación que permite ingresar al sistema (una pérdida constante de 80 W/m²).

1.4.4 Dimensiones del sistema

De acuerdo a la cantidad de agua que se planea radiar, se optó porque el módulo tuviera las dimensiones 0.50 x 0.25 x 0.10 metros, siendo un tamaño conveniente por su fácil manejo y traslado; así mismo por el volumen de agua que llevará y la radiación en la que esta actuará de manera eficiente.

Figura 1 Medidas en metros de la tecnología ambiental



(Sánchez, 2018)

1.4.5 Construcción del sistema

El sistema fue construido a partir de acrílico translúcido de 2 milímetros de espesor y con aberturas de 2/3" en la parte superior y ángulos inferiores para el acceso y evacuación de agua.

Se utilizó un sensor de radiación solar KIMO Instruments ^{mr} SL200 para evaluar la eficiencia del sistema. En la prueba el módulo mantuvo una constante de pérdida de 60 W/m².

Se tomó como pérdida despreciable de acuerdo a la radiación promedio que recibe México y concretamente la existente en la Ciudad de México (por arriba de los 700 W/m²).

Por otro lado, a pesar de que en la investigación no se encontró información sobre los límites permisibles de reflexión de los rayos solares en el metal o superficie reflejante (siendo solamente un aditamento para apoyar a la radiación), se decidió medir la radiación de una hoja de aluminio para saber en qué medida apoyaba al sistema. El índice promedio fue de una cuarta parte de la radiación total.

Figura 2 Vista trasera del sistema



(Sánchez, 2018)

Figura 3 Vista delantera del sistema



(Sánchez, 2018)

1.5 Validación cuantitativa y cualitativa del producto

1.5.1 Variables

Dentro del experimento se encuentran la variable independiente y la dependiente. Factores de correlación que determinan el resultado del experimento.

1.5.1.1 Tiempo

El tiempo de exposición solar del líquido en el sistema fue el primer factor que determinó el resultado, es por ello que se tomó como la primera variable independiente.

1.5.1.2 Radiación solar

La segunda variable independiente fue la radiación solar, ya que su intensidad, ya sea en aumento o disminución, determinó en los resultados de potabilización de la muestra.

1.5.1.3 Agua

La fuente de agua a radiar fue a partir de diferentes espacios, ello con el fin de dar un amplio panorama sobre la efectividad del sistema.

Sin embargo, al ser sometido el líquido a un sistema de radiación, se verá directamente afectado el resultado. Por lo tanto, el agua consistió en la variable dependiente.

1.6 Umbral de actuación

1.6.1 Radiación solar

De acuerdo a la investigación (Lawand, 1988), se ve como viable el aprovechamiento de la radiación solar existente en México como fuente de energía para desarrollar el sistema SODIS.

Reforzado por esta teoría, los posteriores experimentos remarcan este resultado. Sintetizados en la siguiente tabla:

Tabla 1 Análisis de w/m² óptimos para potabilizar agua con método SODIS

LUGAR	HORAS DE EXPOSICIÓN	RADIACIÓN SOLAR W / M ²	AÑO
CANADÁ	5	500	1988
HAITÍ	3 a 5	500	2003
MÉXICO	5	550	2006
ZIMBABWE	6	585	2008
BURKINA FASO	6	629	2010
ETIOPÍA	6	530	2014
ESPAÑA	6	585	2016

(Sánchez, 2017)

Donde se puede apreciar que la radiación permisible ondea los 550 W/m², cantidad de radiación existente en la Ciudad de México.

Siendo matemáticamente aceptable los valores de radiación solar medios (780 W/m²) óptimos para desarrollar el método SODIS en la Ciudad de México.

1.6.2 Calidad de agua

Para garantizar la potabilización del agua resultante del sistema, se midieron los microorganismos y contaminantes que contiene el agua, ello a través de las siguientes normas:

- NMX – AA – 102 – SCFI – 2006, Calidad de agua – Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* Presuntiva – Método de filtración en membrana (Cancela a la NMX – AA – 102 – 1987)
- NOM – 127 – SSA1 – 1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a los que debe someterse el agua para su potabilización.

1.7 Hipótesis

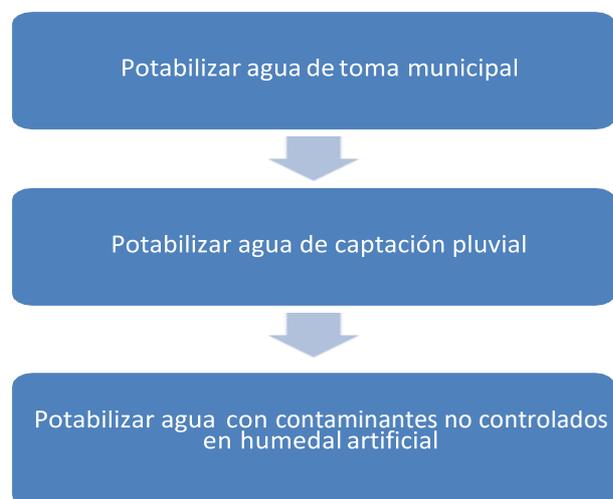
Al desarrollar una tecnología ambiental que brinde agua potable a partir de sistemas pasivos de tratamiento, se obtendrá un sistema adaptable a la arquitectura que no sólo beneficie al ser humano, sino que también sea amigable con el medio ambiente.

1.8 Diseño de experimento

Para evaluar la calidad del agua y comprobar la hipótesis, el experimento se llevó a cabo en las normas NMX – AA – 102 – SCFI – 2006 y NOM – 127 – SSA1 – 1994.

De igual manera, el experimento se realizará en las siguientes fases; donde, de darse un resultado favorable en cada experimento, se desarrollará la siguiente propuesta de trabajo; de lo contrario, se regresará a la mejora del diseño para volver a desarrollar el experimento:

Tabla 2 Fases de evaluación del sistema



(Sánchez, 2018)

Las actividades se desarrollaron durante tres días consecutivos:

Día 1: Se radió el agua en un lapso de 6 horas (9:30 a 15:30 hrs) y posteriormente se realizó el análisis de pH, DQO, nitratos y nitritos; así como la preparación de muestras en caldos de cultivo para determinación de coliformes fecales y coliformes termotolerantes.

Día 2: A las 24 horas de realizada la muestra en caldos de coliformes fecales, se tomó lectura de colonias bacterianas.

Día 3: A las 48 horas de realizada la muestra en caldos de coliformes termotolerantes, se tomó lectura de colonias bacterianas.

De esta manera, se evaluaron los resultados a partir de los umbrales mencionados en la NMX – AA – 102 – SCFI – 2006 y se dio el resultado de potabilidad.

Se organizaron las actividades de la siguiente manera:

En todas las réplicas de experimento, se radiaron los 2 litros de agua en el sistema durante 6 horas, donde a cada 2 horas se retiró una muestra de 400 mililitros para analizar la evolución del proceso. En conjunto, el sensor de radiación solar fue calibrado para dar lectura cada minuto.

En cada toma de 2 horas (los 400 mililitros de la muestra que se retiraron del sistema), fueron divididos en 4 muestras: dos para coliformes fecales y dos para coliformes termotolerantes. Mismas que se midieron a las 24 y 48 horas, respectivamente.

De igual manera, se tomaron 200 mililitros del agua cruda (sin radiar) como indicador de entrada y se realizaron las muestras de coliformes fecales y coliformes termotolerantes, a manera de, una vez concluido el experimento, se dieran resultados de la diferencia de agua entre la inicial y la salida del dispositivo.

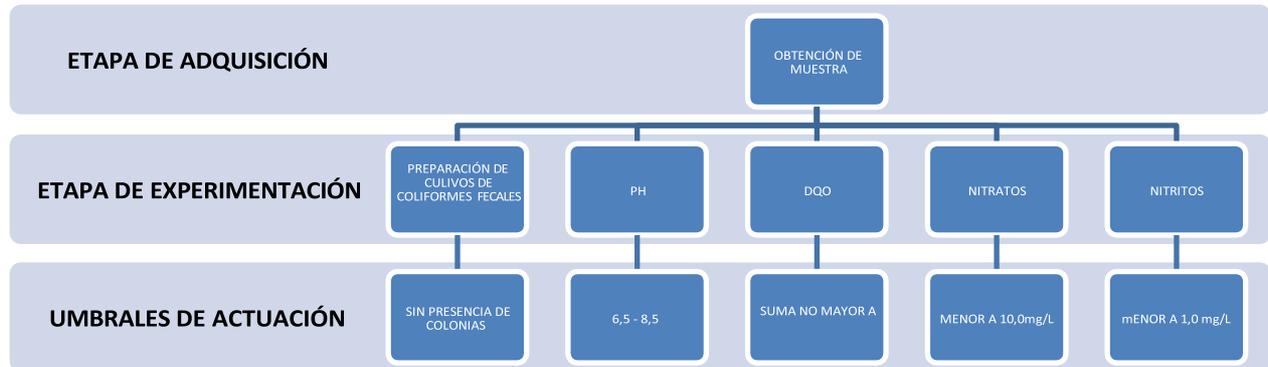
En la prueba DQO se tomaron 6 mililitros de muestra, que a su vez se dividieron en tres muestras: dos de salida y uno de entrada. Se agregaron las muestras al Hach TNT 822 DQO. Posteriormente se calentaron en el termoreactor las muestras a 150 °C durante 2 horas. Una vez transcurrido el lapso, se dejaron templar las muestras y finalmente se tomaron las lecturas en el colorímetro.

En la prueba de nitratos se tomaron 3 mililitros de muestra, divididos en tres muestras: dos de salida y una de entrada. Se usó el Hach KIT 835, donde se agregó el mililitro de agua y se mezcló en vibradora. Posteriormente se dejó reposar durante 15 minutos para tomar la lectura en el espectrofotómetro.

La lectura de pH se tomó a con ayuda de un medidor de pH; mismo que previamente fue calibrado. El sensor se introdujo en la muestra para dar la lectura.

De esta manera, las etapas de evaluación se sintetizan en el siguiente diagrama:

Tabla 3 Etapas del desarrollo del experimento



(Sánchez, 2018)

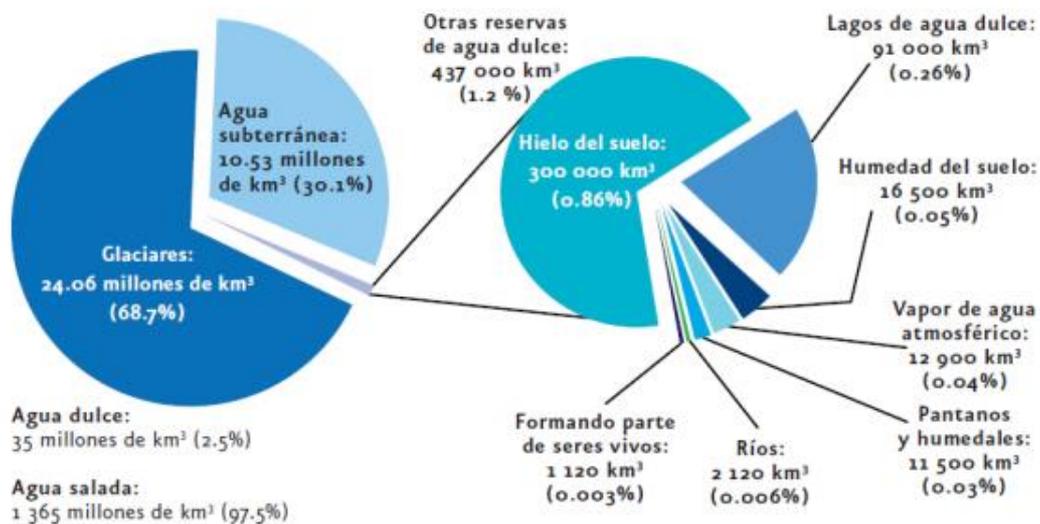
MARCO TEÓRICO

2.1 El agua

2.1.1 El agua a nivel mundial

Se ha estimado que existen alrededor de 1,400 millones de kilómetros cúbicos de agua en el planeta, de los cuales sólo 2.5% es agua dulce (SEMARNAT, 2008). Debe señalarse que este pequeño porcentaje se localiza principalmente en los ríos, lagos, glaciares, mantos de hielo y acuíferos del planeta.

Tabla 4 Disposición a nivel global de agua



(PNUMA, 2002)

Casi tres cuartas partes del agua dulce del planeta están contenidas en los glaciares y mantos de hielo, de los cuales alrededor de 97% son inaccesibles para su uso, ya que se encuentran en la Antártica, el Ártico y Groenlandia. Los glaciares continentales, así como el hielo y las nieves perpetuas de volcanes y cadenas montañosas constituyen una fuente explotable de agua, por lo que son parte importante de los recursos hídricos de muchos países (SEMARNAT, 2008).

El agua subterránea representa 96% del agua dulce no congelada del planeta. Esta fuente resulta importante como abastecimiento para arroyos, manantiales y humedales, así como un recurso fundamental para satisfacer las demandas de agua de muchas sociedades en el mundo. Por su parte, aunque las aguas superficiales (es decir, lagos, embalses, ríos, arroyos y humedales) retienen un pequeño porcentaje del total de los recursos de agua dulce del planeta (0.3%), representan cerca de 80% de las aguas superficiales renovables anualmente. Los lagos del mundo almacenan el mayor volumen de agua dulce superficial (91 mil km³), más de 40 veces el

volumen presente en ríos y arroyos (2,120 km³) y aproximadamente 9 veces el contenido en los pantanos y humedales (SEMARNAT, 2008).

Siendo así, se resume que la disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km³, de estos el 97.5% es agua salada, el 2.5%, es decir 35 millones de km³, es agua dulce y de ésta casi el 70% no está disponible para consumo humano debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo (De Albuquerque, 2010).

Figura 4 Disposición de agua a nivel global en Km²



(FAO AQUASTAT, 2008)

Del agua que técnicamente está disponible para consumo humano, sólo una pequeña porción se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos subterráneos relativamente poco profundos, cuya renovación es producto de la infiltración. Mucha de esta agua teóricamente utilizable se encuentra lejos de las zonas pobladas, lo cual dificulta o vuelve imposible su utilización efectiva. Se estima que solamente el 0.77% se encuentra como agua dulce accesible al ser humano (Van der Valk, 2011)

En su Comentario General N° 15 sobre el cumplimiento de los artículos 11 y 12 del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, el Comité hizo notar que “el derecho humano al agua es indispensable para llevar una vida en dignidad humana” y señaló que “es un pre requisito para la realización de otros derechos humanos”.

Sin el acceso equitativo a un requerimiento mínimo de agua potable otros derechos fundamentales serían inalcanzables, como el derecho a un nivel de vida adecuado para la salud y para el bienestar, así como los derechos civiles y políticos. Por ello que el agua se considera como un derecho universal de mujeres y hombres.

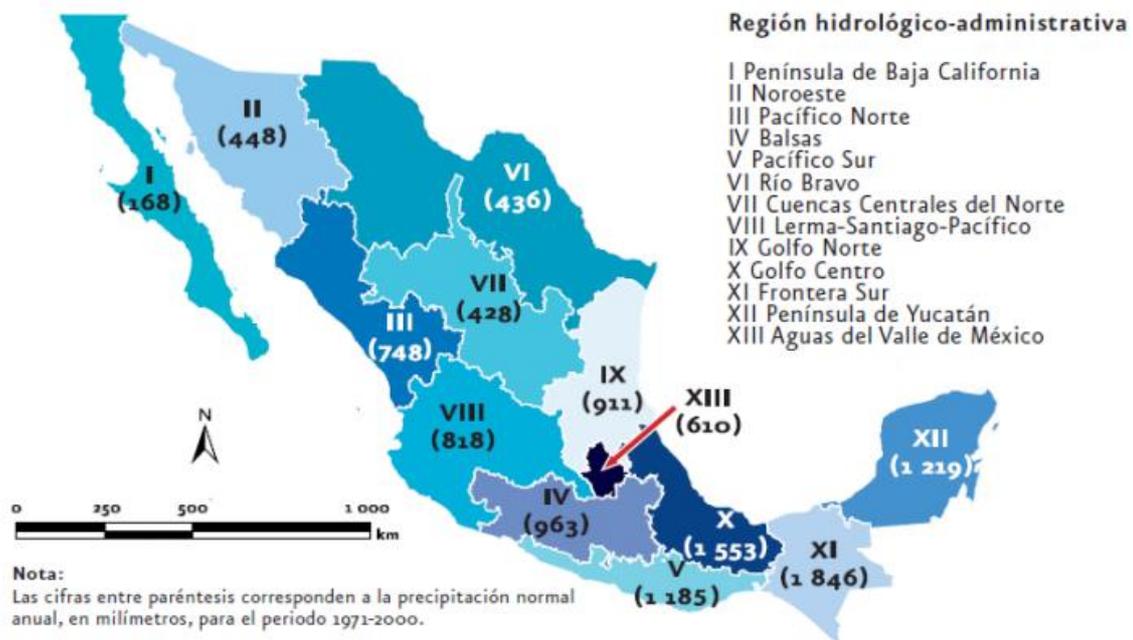
2.1.2 El agua a nivel nacional

En México, la precipitación promedio anual durante el período 1971-2000 fue de 760 milímetros, un volumen que se considera abundante (CNA, 2008). Sin embargo, esta cifra resulta poco representativa de la situación hídrica a lo largo del país. En estados como Baja California

Sur, apenas se registran 161 milímetros de lluvia en promedio al año, mientras que en Tabasco la precipitación alcanza los 2 mil 102 milímetros (SEMARNAT, 2008).

A nivel de las regiones hidrológico-administrativas de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), las diferencias también son claras. Las regiones I, II, III y VI, localizadas en el norte del país y que ocupan 45% del territorio nacional, reciben 26.5% de la precipitación; en contraste las regiones administrativas IV, V, X, XI y XII, situadas en la parte sur, que ocupan 27.6% del territorio reciben en promedio 48.7% de la lluvia (SEMARNAT, 2008).

Figura 5 Precipitación promedio por región en México



(CONAGUA, 2008)

En el contexto mundial, la disponibilidad de agua por habitante en México en la actualidad es mucho menor que la de países como Canadá (91 420 m³/hab/año), Brasil (45 570 m³/hab/año) o Estados Unidos (10 270 m³/hab/año), y en general toda América del Sur, pero ligeramente superior al promedio de los países europeo (PNUMA, 2002).

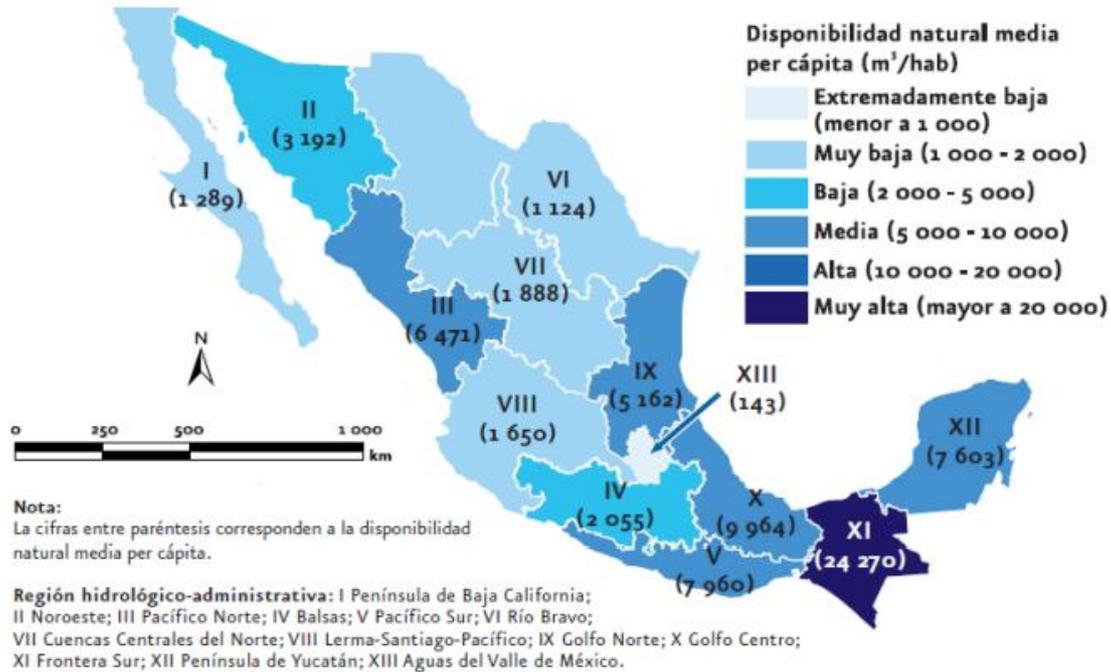
Una disponibilidad inferior a los mil 700 metros cúbicos por habitante por año se considera como una situación de estrés hídrico (Indicador de Falkenmark; UNDP *et al.*, 2000), en la cual con frecuencia puede ocurrir el desabasto de agua para las diversas actividades que la consumen (sobre todo en países con propensión a sufrir sequías, como es el caso de México).

Cuando la disponibilidad es inferior a los mil metros cúbicos por habitante por año, las consecuencias pueden ser más severas y comprometen seriamente la seguridad alimentaria, el desarrollo económico del país y la protección de sus ecosistemas.

Por lo general, en estas circunstancias se carece transitoriamente de agua en algunos lugares y es preciso tomar decisiones que involucran prioridades de uso entre las actividades agrícolas, industriales o el abasto a la población urbana y rural (FNUAP, 2001).

La disponibilidad per cápita en la Región Del Valle de México es de 143 metros cúbicos por habitante por año, lo que la clasifica en la categoría de disponibilidad extremadamente baja, mientras que la región de la Frontera Sur, con 24 mil 270 metros cúbicos por habitante por año, muestra una disponibilidad calificada como muy alta. Tomando en cuenta tan sólo a las regiones hidrológico-administrativas del país con disponibilidades iguales o menores a los mil 700 metros cúbicos por habitante por año, 60 millones de habitantes en el país se encuentran en situación de estrés hídrico (SEMARNAT, 2008).

Figura 6 Disponibilidad natural media per cápita por región hidrológico – administrativa

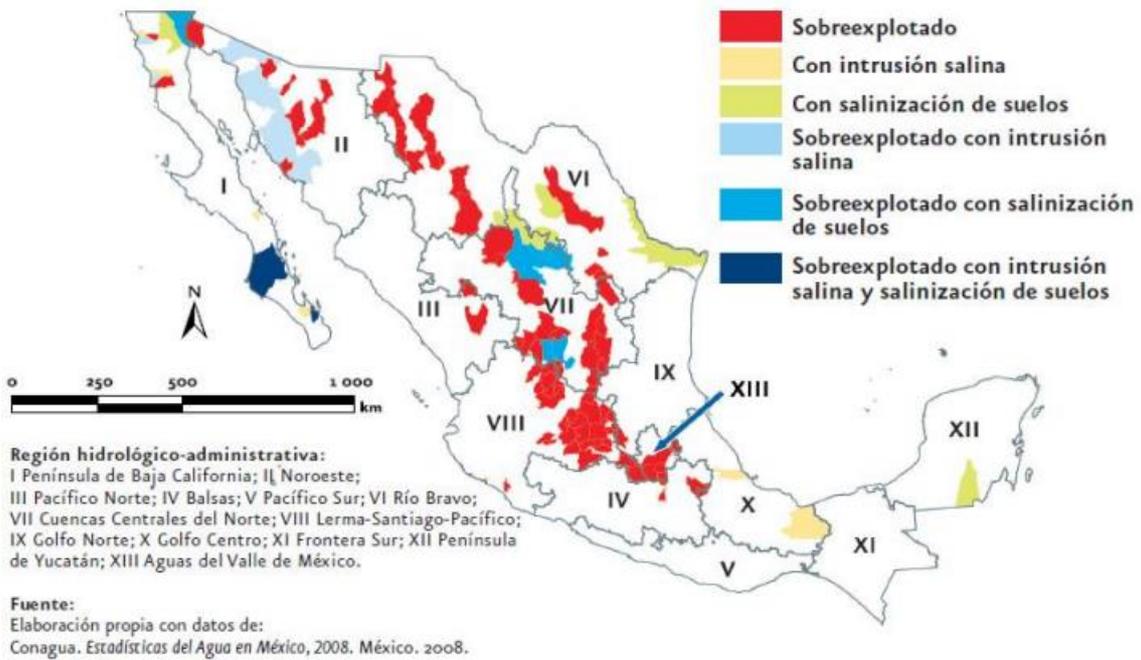


(CONAGUA, 2008)

De acuerdo con un estudio enfocado a detectar áreas donde la disponibilidad de agua podría caer por debajo de los mil 700 metros cúbicos por habitante por año para el año 2025 y realizado en diferentes cuencas de los principales ríos del mundo (de los cuales se tenía información confiable de aspectos hidrológicos y poblacionales), se identificó que en México las cuencas de los ríos Balsas, Grande de Santiago y Colorado podrían caer en esta situación (UNDP *et al.*, 2000).

Para el año 2030, considerando que la disponibilidad natural se mantendrá constante, los pronósticos señalan que dos regiones más, las de la Península de Baja California y Río Bravo, se integrarán a la lista de las regiones con categoría de disponibilidad extremadamente baja, mientras que las regiones Balsas y Cuencas Centrales del Norte (actualmente con disponibilidad per cápita baja) tendrán una disponibilidad catalogada como muy baja (SEMARNAT; 2008).

Figura 7 Situación de los acuíferos por región hidrológico – administrativa



(CONAGUA, 2008)

Tabla 5 Proyección de la disponibilidad de agua per cápita nacional a 2030.

Región hidrológico-administrativa		Disponibilidad natural por habitante en 2030 (m ³ /hab/año) ^a	Categoría de disponibilidad en 2030
I	Península de Baja California	780	Extremadamente baja
II	Noroeste	2 819	Baja
III	Pacífico Norte	6 753	Media
IV	Balsas	1 946	Muy baja
V	Pacífico Sur	8 154	Media
VI	Río Bravo	907	Extremadamente baja
VII	Cuencas Centrales del Norte	1 703	Muy baja
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	1 448	Muy baja
IX	Golfo Norte	5 001	Media
X	Golfo Centro	9 618	Media
XI	Frontera Sur	21 039	Muy alta
XII	Península de Yucatán	5 105	Media
XIII	Aguas del Valle de México	127	Extremadamente baja
Nacional		3 783	Baja

Nota:
^aCálculo basado en la proyección de la población a 2030 del Conapo.

(Conagua, 2008)

La segunda causa de la escasez de agua se encuentra la creciente urbanización de los países, la cual podría exacerbar el problema en virtud de la mayor demanda de una mayor población más concentrada (UN, 2007). En 1950, de los 2 mil 500 millones de habitantes del planeta, tan sólo el 29% vivía en zonas urbanas, mientras que el restante 71% (alrededor de mil 800 millones de personas) habitaba zonas rurales. Para el año 2050, según estimaciones, la situación se invertirá: cerca del 70% de la población global (6 mil 400 millones) vivirá en ciudades, y el resto (30%, es decir, 2 mil 790 millones de personas) ocupará las zonas rurales (UN, 2008)

México ha seguido un patrón de urbanización similar al mundial. En 1970, el 51.7% de la población vivía en zonas urbanas, y se incrementará hasta 68% en el año 2030 (CONAPO, 2006; Reyna y Hernández, 2006), lo cual podría incrementar, en las regiones más urbanizadas, como el centro y poniente del país, la condición crítica de abasto de agua.

En tercer lugar, como fuerza impulsora de la escasez de agua se encuentra el consumo per cápita. En la medida que el desarrollo económico eleva el estado de bienestar de los países, el consumo por habitante tiende a crecer (UN, 2007).

2.1.3 El agua en la urbanización

El bienestar de la población depende, en gran medida, de su acceso a servicios básicos, siendo el agua potable y alcantarillado dos de los más importantes. Estos servicios no sólo satisfacen la sed y otras necesidades domésticas como la higiene en los hogares, sino que también se ligan íntimamente a la salud de la población. Actualmente se reconoce que el agua contaminada genera 80% de las enfermedades en los países en desarrollo, la muerte anual de 2.2 millones de personas (de las cuales 50% son niños menores de 5 años) y 400 millones de casos de malaria (Carabias y Landa, 2005).

Claramente ha sido imperativo para los gobiernos del mundo el impulso hacia la construcción de la infraestructura hidráulica que lleve los servicios de agua potable y alcantarillado a sus crecientes poblaciones. Sin embargo, falta mucho por hacer.

Aun cuando el último informe de los Objetivos de Desarrollo del Milenio destaca que de 1990 a la fecha mil 600 millones de personas en el mundo tienen acceso a fuentes de agua potable, también reconoce que 2 mil 500 millones de personas no tienen servicios de saneamiento mejorados (UN, 2008).

Por tanto, el desafío de alcanzar la cobertura total de agua potable y saneamiento en zonas urbanas y rurales permanece, para muchos países, incluido México, como uno de sus más grandes retos.

La cobertura mundial de la población con acceso a fuentes de agua apta para consumo humano se estima en alrededor de 83% (WHO-UNICEF, 2004). Sin embargo, existen grandes contrastes: países como Estados Unidos, Francia y Canadá tienen coberturas prácticamente de 100%, mientras que el promedio de África subsahariana apenas alcanza 56%. (WHO-UNICEF, 2004)

En México en el año 2000, la cobertura de agua potable alcanzó 87.9% (valor ligeramente superior al estimado para América Latina y el Caribe (de alrededor de 85%; PNUMA, 2003) y, en 2007, ya se había incrementado a 89.9%. (Conagua, 2007) Entre 2000 y 2007, la cobertura en

zonas urbanas pasó de 94.6 a 94.5%, mientras que en las zonas rurales siguió siendo considerablemente menor, pasando en el mismo periodo de 68 a 74.7%.

Al interior del país, durante el mismo periodo, la mayoría de los estados incrementaron en términos reales la cobertura de este servicio, aunque existen diferencias importantes. Mientras que entidades como el Distrito Federal, Aguascalientes, Colima, Coahuila y Tlaxcala tenían en 2007 coberturas de agua potable superiores a 97%, en Guerrero se daba servicio a poco menos de 75% de la población.

En México, la cobertura de alcantarillado en el país en 2007 fue de 86.1%, valor superior al promedio estimado para América Latina y el Caribe, que es de 79% (PNUMA, 2003). Al igual que en la cobertura de agua potable, también en alcantarillado y drenaje existen diferencias muy marcadas entre las zonas urbanas y rurales. En las primeras se alcanzó una cobertura de 94.2% en 2007, mientras que en las segundas apenas se cubrió 59.9%.

Entre las entidades federativas del país, la Ciudad de México, Aguascalientes, Colima, Jalisco y Nuevo León tienen coberturas mayores a 95%, mientras que los estados de Oaxaca, Guerrero y Yucatán no alcanzan el 70% (SEMARNAT; 2008).

Los estados que tienen mayores diferencias entre la cobertura de agua potable y alcantarillado son Yucatán (28%), Oaxaca (15%) y Tamaulipas (13%). Aunque todas las entidades federativas tuvieron un incremento en su cobertura de alcantarillado entre 2000 y 2007, sobresalen Oaxaca, Campeche, San Luis Potosí, Puebla, Guerrero, Zacatecas, Sinaloa, Chiapas e Hidalgo, con incrementos superiores a 15% (SEMARNAT; 2008).

2.1.4 El tratamiento del agua en la arquitectura

En la arquitectura no se ha logrado integrar una instalación potabilizadora que reintegre, hasta el momento, al elemento agua potable: ya que en una edificación se consume agua limpia, pero se desalojan aguas grises y negras.

El problema cobra peso ya que en la actualidad se requiere el uso de sistemas complejos para limpiar el agua e integrarla a sistemas urbanos y posteriormente, depurar el líquido una vez utilizado.

En un caso más extremo, de no contar con un sistema de desazolve de agua, el líquido en cuestión, ya utilizado, es vertido en mantos hídricos. Donde al entrar en contacto con el agua son envenenados, ocasionando la pérdida y muerte de especies vegetales y animales. Situación que, por desgracia, es la más frecuente en países en vías de desarrollo.

A raíz de ello, surge la actual propuesta de investigación, en la cual se plantea el desarrollo de un dispositivo que (con ayuda de un previo tratamiento de depuración por medio de humedales) y únicamente aprovechando la radiación solar, obtenga la potabilización del agua y su posterior reincorporación a la arquitectura, integrándose a su diseño como una tecnología ambiental pasiva.

En pocas palabras, una edificación lograría una menor dependencia de sistemas externos de potabilización de agua.

Una de las aportaciones que se plantea desarrollar, encaminada a la tecnología, radica en el desarrollo de un dispositivo estético, resistente y, de ser posible, construido a partir de materiales de reuso; puesto que en la actualidad el método SODIS se ha limitado a contener agua en una botella o bolsa traslúcida, sin lograr un sistema organizado y establecido que pueda desarrollarse en serie para agilizar su proceso de difusión y replicación.

2.1.5 Panorama futuro

Así, mientras los factores anteriores modifican la demanda del líquido, el cambio climático tendrá un efecto importante alterando la disponibilidad a nivel mundial. Si el cambio climático sigue los escenarios proyectados, se observará un clima más errático en el futuro, lo que supondrá una mayor variabilidad en las precipitaciones, riesgo para las cosechas agrícolas y el suministro a la población.

En cuanto a la calidad de agua, la situación no refleja cabalmente la magnitud del problema con el líquido. Debido a la descarga continua de aguas residuales sin tratamiento, cargadas de contaminantes domésticos e industriales, así como los escurrimientos con agroquímicos provenientes de las actividades agrícolas y pecuarias asentadas en las diferentes cuencas, la calidad del agua de los cuerpos superficiales y subterráneos se afecta negativamente, con lo cual la escasez del líquido se agrava y se pone en riesgo la salud de importantes segmentos de la población.

Paralelamente, el deterioro y la pérdida de ecosistemas naturales impiden que éstos brinden de manera natural sus bienes y servicios ambientales, entre los que se encuentran la captación y purificación del agua, lo cual agrava la carestía de este valioso recurso. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), en 2002 alrededor de mil 100 millones de personas no tenían acceso al agua potable, lo que representaba cerca de 17% de la población mundial (WHO, 2004). Esto ocurre principalmente en las áreas rurales donde no existe la posibilidad de que el agua tenga tratamiento previo que mejore su calidad y posibilite su uso.

El agua de buena calidad es un atributo que se define en función del uso que se le asigna (ya sea como agua potable, de recreación, para uso agrícola o industrial, por ejemplo), lo que implica necesariamente la existencia de estándares de calidad específicos para los distintos usos (UNDP et al., 2000). Por esta razón, para evaluar la calidad del agua es necesario considerar el uso que tendrá.

La calidad del agua de un cuerpo superficial o subterráneo depende de múltiples factores, algunos de los cuales la reducen directa o indirectamente y otros que pueden revertir los efectos de la contaminación y, por lo tanto, mejorarla.

Entre los factores que reducen la calidad del agua destacan las descargas directas de agua o residuos sólidos provenientes de las actividades domésticas, agropecuarias o industriales. Indirectamente, la disposición inadecuada en el suelo de residuos sólidos urbanos o peligrosos puede ocasionar que escurrimientos superficiales contaminen los cuerpos de agua lóticos o lénticos y que los lixiviados contaminen los acuíferos.

Por otro lado, y actuando para mejorar la calidad del agua, está la capacidad natural de los ecosistemas acuáticos para descomponer o inmovilizar los contaminantes, la cual no obstante

puede ser sobrepasada (ya sea por la misma carga de contaminantes o el deterioro de los ecosistemas), amenazando la biodiversidad acuática y su potencial para seguir proporcionando estos y otros servicios ambientales (Vörösmarty *et al.*, 2005).

2.2 Radiación solar

2.2.1 Origen de la radiación

La energía solar resulta del proceso de fusión nuclear que tiene lugar en el sol. Esta energía es el motor que mueve nuestro medio ambiente, siendo la energía solar que llega a la superficie terrestre 10.000 veces mayor que la energía consumida actualmente por toda la humanidad. La radiación es transferencia de energía por ondas electromagnéticas y se produce directamente desde la fuente hacia fuera en todas las direcciones.

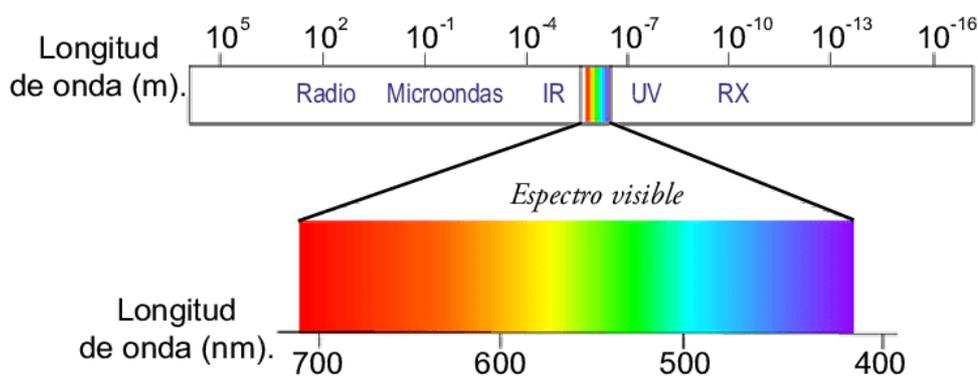
Estas ondas no necesitan un medio material para propagarse, pueden atravesar el espacio interplanetario y llegar a la Tierra desde el Sol.

La longitud de onda y la frecuencia de las ondas electromagnéticas, son importantes para determinar su energía, su visibilidad y su poder de penetración. Todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad de 299,792 Km/s (por conveniencia redondeado a 300,000 Km/s). Estas ondas electromagnéticas pueden tener diferentes longitudes de onda (AEM, 2008).

El conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético.

De esta manera, el conjunto de las longitudes de onda emitidas por el Sol se denomina espectro solar.

Figura 8 Espectro electromagnético



(Introducción a la fotogrametría, 2014)

La proporción de la radiación solar en las distintas regiones del espectro es aproximadamente:

Ultravioleta: 7%

Luz visible: 43%

Infrarrojo: 49%

El resto: 1%

2.2.2 Radiación Ultravioleta.

La Radiación Ultravioleta cubre el rango espectral desde los 100 a los 400 nm (nanómetros). Se divide en:

- 1- Ultravioleta C de 100 a 280 nm. Absorbida totalmente por el ozono.
- 2- Ultravioleta B de 280 a 320 nm. Absorbida parcialmente por el ozono.
- 3- Ultravioleta A de 320 a 400 nm. Apenas absorbida por el ozono.

Aunque tan sólo representa el 7 % de la radiación total, los efectos que provoca sobre los seres vivos y el medio ambiente hacen que sea muy importante. Así las variaciones tienen una influencia relevante sobre la salud (cáncer de piel, cataratas), el clima (variación del balance energético terrestre), procesos biológicos (fotosíntesis), ecológicos (modificación de ecosistemas) y fotoquímicos (formación y descomposición de contaminantes) (AEM, 2008).

Todo esto unido a una posible disminución de la capa de ozono, provocando una mayor cantidad de radiación UV, resultaría muy dañino sobre todo para la salud humana. Por todo esto la Organización Mundial para la Salud puso en marcha la medida sistemática de la radiación UVB.

En este sentido la Unión Europea puso en marcha en 1996 la acción COST para estandarizar la medida de la radiación UVB en el mundo. (AEM, 2008)

Se define un estándar de peligrosidad de la radiación UV, que es el UVI (Índice Ultravioleta), que se calcula multiplicando la irradiancia eritemática en W/m^2 por 40. Con unos intervalos de peligrosidad según el índice:

0-3 Riesgo Bajo

4-6 Riesgo Medio

7-9 Riesgo Alto

>10 Riesgo Extremo

Tabla 6 Categoría de radiación ultravioleta de acuerdo a su peligrosidad en piel humana.

UVI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	>10
CATEGORÍA	BAJO		MODERADO			ALTO		MUY ALTO		EXTREMO	

(AEM, 2008)

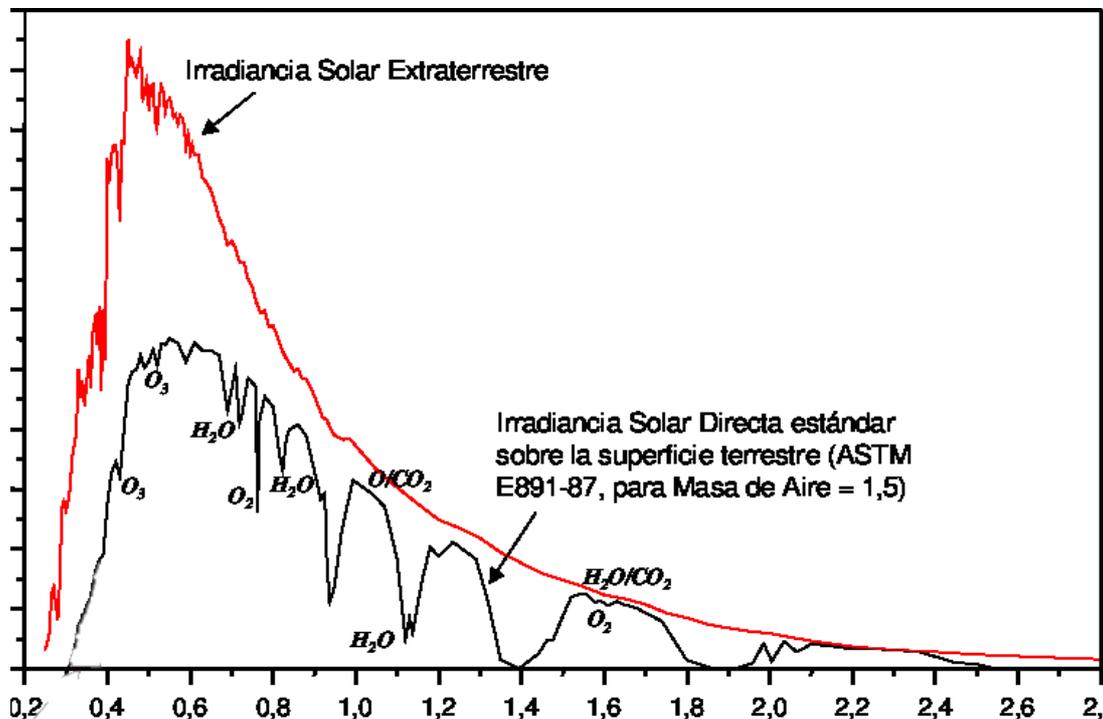
Leyes de la radiación

Para entender mejor como la energía radiante del Sol interactúa con la atmósfera de la Tierra y su superficie, se deben conocer las leyes básicas de radiación. Como las técnicas matemáticas

están fuera del propósito del curso, estas leyes se enuncian cualitativamente, (Inzulza, J., 2005) de la forma siguiente:

- 1- Todos los objetos emiten energía radiante, cualquiera sea su temperatura, por ejemplo: el Sol, la Tierra, la atmósfera, los Polos, las personas, etc.
- 2- Los objetos con mayor temperatura radian más energía total por unidad de área que los objetos más fríos. El Sol con una temperatura media de 6000 K en su superficie, emite $1.6 \times 10^5 (6000/300)^4$ veces más energía que la Tierra con una temperatura media en superficie de 290 K = 17° C.

Tabla 7 Esquema de radiación solar y terrestre



(Fernández I, 2010)

- 3- Los cuerpos con mayor temperatura emiten un máximo de radiación en longitudes de ondas, λ , más cortas. El máximo de energía radiante del Sol se produce para longitudes de onda λ 0.5 μm , para la Tierra en λ \sim 10 μm .

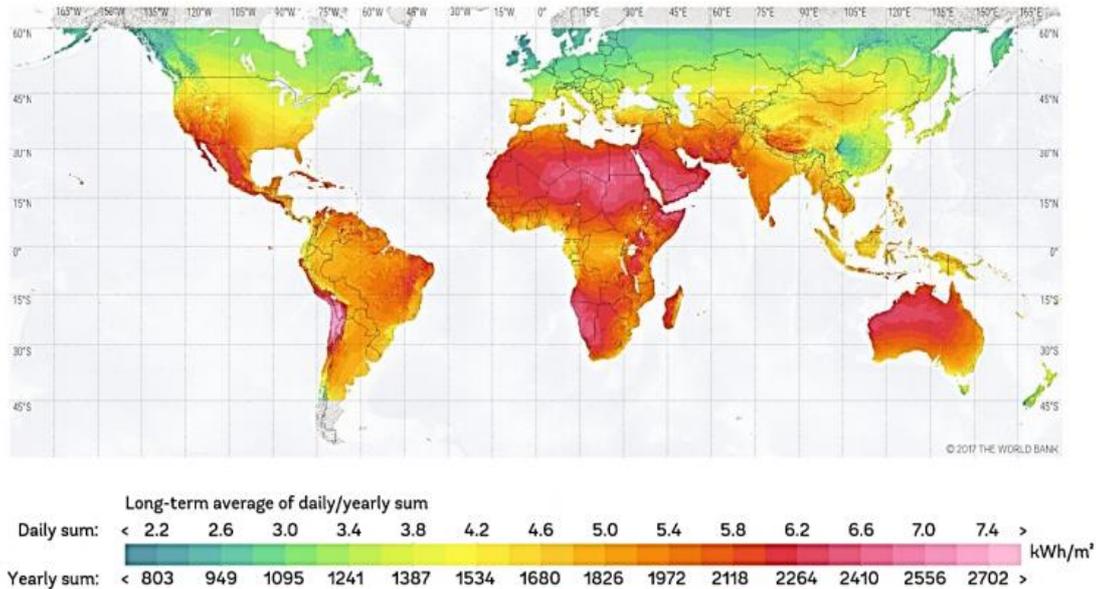
2.2.3 Irradiación solar global

La mayor parte de la energía que llega hasta el planeta Tierra procede del sol, en forma de radiación electromagnética. Dependiendo de la longitud de las ondas, son más o menos intensas. Así, por ejemplo, la radiación ultravioleta al ser muy corta (de 360 nanómetros), lleva mucha energía, a diferencia de las ondas de radio cuyas ondas son muy largas.

No toda la radiación que nos llega del sol es absorbida por el planeta de la misma manera. De hecho, tan sólo un 26% se absorbe directamente, mientras que la atmósfera absorberá el equivalente al 16%. También llega reflejada, por ejemplo, por los materiales que hay en el planeta (un 10%) o por las nubes (24%).

Además, la radiación solar no llega igual a todos los rincones. Ello se debe a que los rayos son absorbidos en mayor grado en torno al ecuador, mientras que en los polos son mucho más débiles. Algo que influye directamente en el clima del lugar.

Figura 8 Irradiación solar global



(AEM, 2008)

En el mapa anterior se puede apreciar con detalle la energía solar que recibe cada país del planeta. En muchas zonas, una alta energía suele estar relacionada con un nivel bajo de precipitaciones, como en el desierto del Sáhara; pero en otras se puede ver una gran explosión de vida, como en el Amazonas. (Solar Atlas, 2017)

Parámetros en los que se puede apreciar que por la ubicación geográfica México es beneficiado por la radiación solar.

2.2.4 Irradiación solar en México

México se encuentra dentro de esa franja del cinturón solar; por ello, figura entre los tres países con mayor energía de este tipo, sólo después de China y Singapur (después se encuentran Australia y la India).

Según la Secretaría de Energía se estima que el potencial solar bruto del país es de 5kWh/m² diarios, lo que corresponde a 50 veces la generación eléctrica nacional.

Durante el invierno) la irradiación global presenta los valores más bajos en el norte del país: 2-2.5 Kw/m² día, y sobre la vertiente del Golfo de México por efecto de los sistemas frontales en esta época.

Hacia el sur de la República estos valores aumentan ligeramente conforme disminuye la latitud, alcanzando temporalmente cifras elevadas de hasta 4.5-5 kWh/m² día en la región que

comprende los estados de Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Morelos, Puebla y Chiapas. En la península de Yucatán se presentan cifras intermedias de 3.5-4.5 kWh/m² día. (Tejeda, M., *et al.*, 2015)

Figura 9 Irradiación global de enero (Kwh/m² día)



(Tejeda, M., *et al.*, 2015)

En el período comprendido entre enero y abril ocurre un aumento de la irradiación global en toda la República Mexicana. Este aumento es mayor en el noroeste de México con hasta 7 kWh/m² día, mientras que en el resto de la República los valores que se alcanzan son del orden de 6 kWh/m² día. (Tejeda, M., *et al.*, 2015)

Figura 10 Irradiación global de abril (Kwh/m² día)



(Tejeda, M *et al.*, 2015)

Durante el verano la irradiación global en la República Mexicana es máxima en el noreste y en la península de Baja California (7-8 kWh/m² día). En el resto del país es de 5-6 kWh/m² día, valores bajos que se deben a la entrada de aire marítimo tropical en la porción sur de México (Tejeda, M., *et al.*, 2015).

Figura 11 Irradiación global de julio (Kwh/m² día)



(Tejeda, M *et al.*, 2015)

Para el mes de octubre la distribución correspondiente de la irradiación solar global en México. Los valores son de los más bajos de todo el año debido a los máximos de nublados y las lluvias que se presentan en este mes (y en septiembre) primordialmente.

Además, octubre inicia la transición a los fenómenos meteorológicos del invierno, por lo que en la región del noreste (Baja California, Sonora y Chihuahua) se observa un mínimo por efecto de las masas de aire polar que empiezan a ingresar al territorio mexicano (Tejeda, M., *et al.*, 2015).

Figura 12 Irradiación global de octubre (Kwh/m² día)

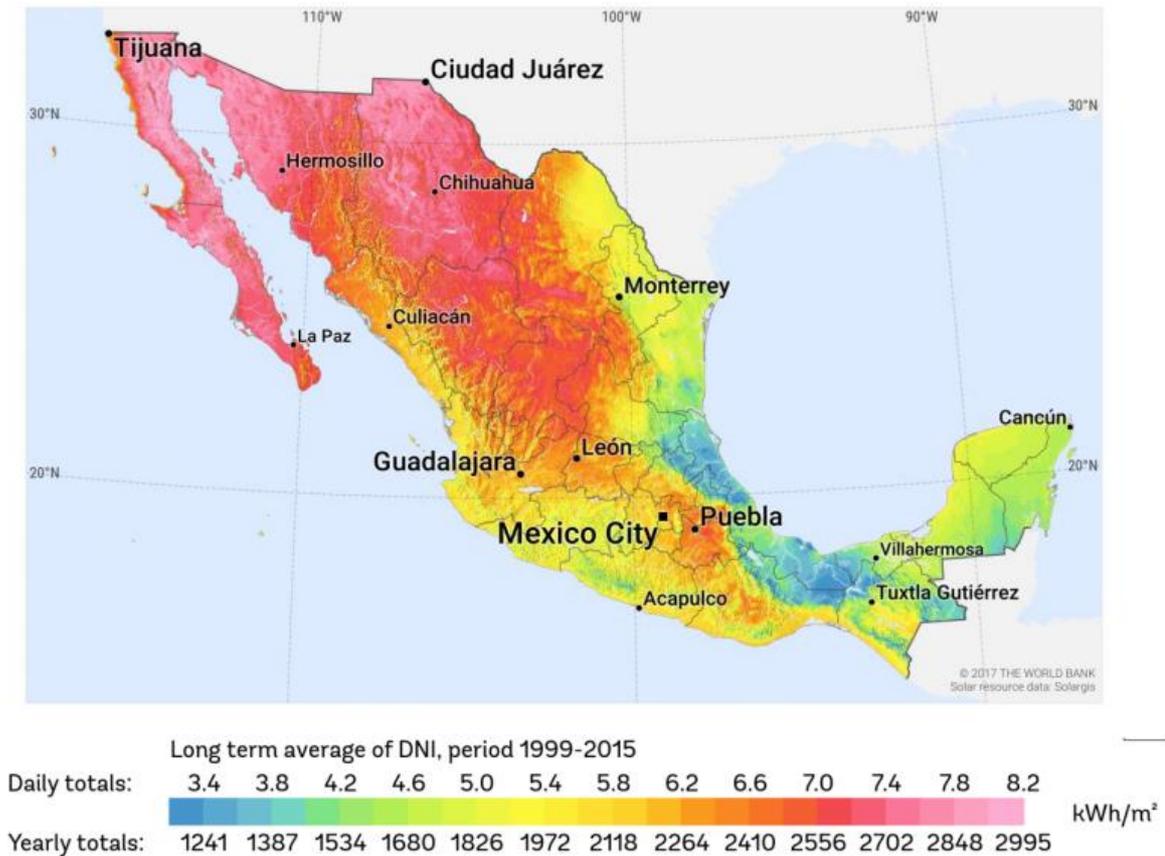


(Tejeda, M *et al.*, 2015)

La irradiación alta que llega a la región del noroeste se debe al anticiclón semipermanente del Pacífico, viéndose ésta disminuida en verano por las nieblas originadas por la inversión de los alisios, y en invierno por la influencia de los sistemas frontales y la corriente en chorro.

En la vertiente del Golfo, estos valores anuales bajos (5.5-6 kWh/m² día) se deben a los sistemas polares y al aire marítimo tropical del verano (Tejeda, M., *et al.*, 2015).

Figura 13 Irradiación solar nacional anual (Kwh/m² día)



(AEM, 2008)

De esta manera se concluye que México es uno de los países con más irradiación del mundo, (Ecoosfera, 2014) brindando la posibilidad de implementar la metodología SODIS como fuente alterna para potabilizar agua.

2.3 Método SODIS

El problema fundamental con la disponibilidad del agua es que la cantidad del líquido es prácticamente invariable y no así la demanda de una población creciente que requiere mayor cantidad de alimentos, productos manufacturados y energía.

El tema de la escasez es por tanto uno de los más importantes de la agenda ambiental global. Las Naciones Unidas en el año de 2007 reconocieron cuatro fuerzas fundamentales que podrían incrementar la escasez de agua en las décadas siguientes.

La primera de ellas corresponde al crecimiento de la población.

En 2005, la población mundial alcanzó los 6 mil 400 millones, esperando que para el año 2050, la población del mundo podría contabilizar los 8 mil 900 millones de personas, lo que reducirá significativamente la disponibilidad per cápita. Se estima que en el 2025 cerca de mil 800 millones de personas vivirán en países o regiones en condición de completa escasez de agua,

mientras que dos terceras partes de la población mundial podrían estar sujetas a condiciones de estrés hídrico (UNEP, 2007, p.2).

De esta manera, las comunidades científica y tecnológica se han dado a la tarea de dar solución a este problema de una manera sencilla y distribuible posible. Ello ha dado una inmensa gama de alternativas factibles para amortiguar el problema: hervir, clorar, radiar y filtrar. Sin embargo, con estas propuestas se genera un nuevo problema: los hidrocarburos y contaminantes que son consumidos previos y durante el proceso de la depuración de agentes bacteriológicos del líquido.

En el caso de hervir, es necesario un combustible que lleve al punto de ebullición el líquido para desproveerlo de agentes contaminantes; el cloro se presenta como un corrosivo altamente peligroso para el medio ambiente; la radiación requiere de una fuente externa (principalmente la proveniente de la electricidad) para poder funcionar; y por medio de filtración, constantemente se deben cambiar las capas aislantes.

Siendo así, el problema original está resuelto; o al menos, en apariencia; porque se empiezan a generar nuevos problemas que eventualmente se transforman en agregados para el cambio climático. Dejando muy en claro que la eficiencia ecológica en los métodos previamente descritos, no se ha alcanzado aún.

Dicha eficiencia ecológica (la cual se utilizará como guía dentro de la presente investigación) fue descrita como postulados por Gerard K. O'Neil (O'Neil, 1979), donde propone lo siguiente:

- Toda propuesta de mejorar la condición humana tiene sentido sólo si a largo plazo encierra el potencial de dar a todo el mundo, sin importar su lugar de nacimiento, acceso a energía y materiales necesarios para su progreso.
- Una mejora técnica será beneficiosa si tiende a reducir más que a aumentar la concentración de poder y control sobre los recursos naturales y artificiales.
- Toda mejora es valiosa si contribuye y tiende a reducir la escala de ciudades, industrias y sistemas económicos, de modo que la burocracia pierda importancia y el contacto humano directo sea más fácil y eficaz.
- Una línea de desarrollo estimable debe englobar un período de vigencia útil, sin caer en absurdos, de por lo menos varios centenares de años.

Es por ello que surgió la propuesta, a mediados de la década de 1980, para que el Doctor T. Lawand de la Universidad de Montreal, investigara el espectro de radiación solar como una alternativa para potabilizar el agua (Lawand, 1988).

El proceso es sencillo: basta con colocar agua en una botella traslúcida (de vidrio o PET) sobre una lámina metálica. En un lapso de 5 a 8 horas diurnas, y con buen asoleamiento, el agua se potabiliza.

Esto debido a la manera en que el espectro de Radiación Ultravioleta perfora los microorganismos hasta corromper y desintegrar sus cadenas de ADN. Partiendo de este principio se encontró que las ondas de radiación solar tienen la intensidad y duración suficientes para lograrlo.

El proyecto (que duró cinco años, aproximadamente), fue evaluado por diversas sedes como: el International Development Research centre (Canadá); la United Nations University (Japón); y el

Brace Research Institute (Canadá). Ello a raíz de poder comprobar los resultados de la investigación.

Entre los resultados de la investigación, destacan las siguientes:

- En muchos lugares del mundo (Colombia, Egipto, Nigeria, Perú y Canadá), bajo diferentes condiciones de radiación solar, clima, fuentes de agua y nivel y tipo de contaminación bacteriana, la radiación solar ejerció un efecto germicida sobre pequeñas cantidades de agua contaminada por microorganismos.
- Se puede potabilizar en pequeñas dosis (consumo casero). Esto se debe a que como el método funciona a través de la superficie permeable, a mayor volumen se reduce la eficiencia de la radiación.
- La infección por agua solar es eficaz cuando la intensidad de la radiación solar es de al menos 500 W/m^2 durante 5 horas.
- El proceso de desinfección es efectivo en agua clara. El agua turbia disminuye significativamente el nivel de inactivación solar de las bacterias. Por lo tanto, el agua turbia debe someterse preferiblemente a pretratamientos como sedimentación, filtración y posiblemente coagulación antes de la desinfección solar.
- La descontaminación solar da un resultado óptimo cuando el agua se expone en recipientes transparentes de vidrio o plástico.
- Las variaciones de la temperatura del agua por debajo de 40°C no parecen jugar un papel significativo en la inactivación de las bacterias en el agua. La técnica de desinfección de agua solar ha sido probada con resultados positivos a temperaturas del agua tan bajas como 12°C .

Después de ello, el proceso de *Solar Water Desinfection* pasó a ser llamado Método SODIS, (como abreviatura a su nombre en inglés), y en repetidas investigaciones posteriores, se volvió a evaluar el proceso, dando siempre por resultado, ha dado una alternativa a la potabilización de agua con poca inversión.

La sencillez del proyecto, así como su eficiencia, han generado que actualmente se desarrollen campañas mundiales (principalmente por parte de la OMS y la ONU) para dotar de agua a las comunidades que carecen de ella. Ello como reconocimiento de validez internacional durante el Día Mundial del Agua en 2001.

Desde entonces, se ha implementado a lo largo del planeta, difundiéndose en las comunidades de escasos recursos (principalmente al sur de Asia y al norte de África); siempre con resultados óptimos.

Uno de los primeros estudios posteriores a la validación del método, fue en el año de 2003 en Haití, (Oates, 2003) donde se implementó el experimento de manera virtual con un cálculo desarrollado por la NASA.

Teóricamente, por la ubicación geográfica de Haití, se tienen un nivel de radiación solar primordial, llegando a más de 1.3 KW. La hipótesis sugiere que todo el año, Haití podría disponer del método SODIS sin riesgo alguno.

En 2008, se llevó a cabo un estudio aplicado en Zimbawe, África.

El proyecto se desarrolló en botellas PET, las cuales fueron expuestas a la radiación 6 horas, con una radiación promedio de 585 W/m^2 ; arrojando resultados óptimos para el desarrollo del

método; aunque se debe recalcar que una de las limitantes resultó ser la escasez de botellas PET en la región (Murinda, 2008).

Posteriormente, en el año de 2010, en la región de Ouagadougou, en Burkina Faso, (Sciacca, 2010) se desarrolló el mismo experimento, sometiendo el líquido a una radiación promedio de 620 W/m^2 durante 6 horas. El resultado volvió a ser exitoso.

En el año de 2014 en Etiopía (Dessie, 2014) se llevó a cabo la misma prueba SODIS, nuevamente en botellas PET. Las variables de radiación oscilaron entre los 530 W/m^2 y se expuso a la radiación solar durante 6 horas. El proyecto una vez más presentó resultados favorables para seguir desarrollándolo.

Posteriormente, en el año 2016, en Almería, España, (Malato, 2016) se llevó a cabo el desarrollo de una planta piloto en una Plataforma Solar impulsada con el mismo método de desinfección. Con una radiación solar promedio de 580 W/m^2 y en un periodo de exposición solar de 6 horas, se obtuvieron excelentes resultados.

El proyecto dio inicio con bastidores verticales reflejantes de aluminio, vidrio y plástico con un canal a manera de serpentín que permitió dar agua potable.

Figura 14 Panel potabilizador en España



(Malato, 2016)

En nuestro país, durante los meses de junio y julio del año de 2006, (Gutiérrez, 2006) por medio de la Universidad Autónoma de Querétaro, quien impartió el experimento en el municipio de Valle de Santiago, en el estado de Guanajuato.

La prueba se evaluó durante una semana, tomando la NOM 127-SSA1-1994 “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano – límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización” para verificar si es potable o no la muestra.

En la conclusión se llegó llegando a un índice de coliformes menores a 3 NMP/100 ml, lo cual se indica como agua óptima para ser consumida sin riesgo (nuevamente de acuerdo a la NOM-127-SSA-1994).

De esta manera, se comprobó la viabilidad del método SODIS para ser aplicado en México.

A pesar de ser un método validado por su eficiencia y relativa sencillez, en la actualidad existen manuales (Luzi, 2016, p.109); (Schertertenleib, 2002) donde uno puede conocer, implementar y evaluar el método a manera de probarlo y a su vez, distribuirlo.

Tras más de una década de investigación en el manual "Solar Water Disinfection A guide for the application of SODIS" (Schertertenleib, 2002) destacan las siguientes conclusiones:

- Los contenedores apropiados son botellas de PET transparentes de hasta 2 litros de volumen.
- En condiciones climáticas cálidas, donde las temperaturas del agua alcanzan los 50 ° C durante la exposición, se pueden usar botellas medio ennegrecidas, ya que la temperatura del agua aumenta más rápidamente en tales botellas.
- En regiones de gran altitud, donde la temperatura del agua permanece fría, se deben usar botellas completamente transparentes para optimizar el efecto de UV-A.
- La eficiencia de SODIS aumentará si las botellas se colocan en una superficie reflectante como, por ejemplo, aluminio.
- La botella debe estar expuesta al sol durante 6 horas si el cielo está despejado o con un 50% de nubosidad. La botella debe estar expuesta al sol durante 2 días consecutivos si el cielo está 100% nublado. Durante días de lluvia continua, SODIS no funciona satisfactoriamente. Se recomienda recolectar agua de lluvia durante estos días. Si se alcanza una temperatura del agua de al menos 50 ° C, es suficiente un tiempo de exposición de 1 hora.
- El agua con una turbidez de más de 30 NTU necesita ser filtrada antes de ser llenada en la botella SODIS.
- La eficiencia de SODIS se incrementa a niveles más altos de oxígeno en el agua. La aireación del agua se puede lograr agitando las botellas llenas 3/4 durante aproximadamente 20 segundos antes de que se llenen por completo.

Siendo así, y de acuerdo al análisis de radiación solar en México, se ve un panorama viable para aprovechar el método SODIS en nuestro país.

EXPERIMENTO

A continuación, se presentan los aspectos metodológicos que se llevaron a cabo en el experimento y la correcta medición de las pruebas.

3.1 Lugar

El experimento fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental en el Centro Tecnológico de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM. Espacio controlado, supervisado y atendido por personal capacitado para desarrollar las pruebas mencionadas en el capítulo anterior.

Figura 15 Centro Tecnológico de la Facultad de Estudios Superiores Aragón



(Sánchez, 2018)

Finalmente, para el experimento del humedal natural, se transportó el recurso en un contenedor a 2°C y será trasladado al Centro Tecnológico en un lapso no mayor a 6 horas. Ello de acuerdo a la NMX – AA – 102 – SCFI – 2006 y NOM 127-SSA1- 1994 y NMX.

Así mismo, en dicho espacio se buscó un lugar libre de objetos que puedan generar sombra sobre el sistema (interfiriendo con el método SODIS); con el horizonte libre de obstáculos en todo momento.

3.2 Obtención de muestra

Descrito en la NOM 127-SSA1- 1994 y NMX, el agua a emplear en el sistema se extrajo del medio en bolsas estériles y se refrigeró a 2 °C. así mismo, se tuvo la precaución de no dejarla en un periodo superior a las 72 horas de haberla obtenido.

El agua de precipitación pluvial (Fase 2) se colectó en bandejas de vidrio limpiadas anteriormente con alcohol y posteriormente fueron tamizadas en mallas de tela pellón de cubrebocas nuevos, como un método de retirar partículas y almacenar únicamente líquido.

Para la Fase 3 se utilizó el agua del humedal artificial del Bosque de San Juan de Aragón, un ecosistema de fácil de alto valor biológico.

Figura 16 Humedal Artificial de San Juan de Aragón



(Sánchez, 2018)

Posteriormente a la obtención (en bolsas estériles) se filtró en tela pellón y se refrigeraron las muestras para su futura experimentación.

3.3 Materiales

Para realizar el experimento, en sus 3 fases de desarrollo, fue necesario disponer de materiales esenciales para realizar las pruebas de validez. Mismos que dispuso el Centro Tecnológico (descritos en el Anexo 1)

3.3.1 Tecnología Ambiental

La muestra de agua, ya fuera de red municipal, precipitación pluvial o de humedal, se mantuvo siempre contante en un volumen de 2 litros.

Figura 17 Tecnología ambiental desarrollada



(Sánchez, 2018)

Se radió el líquido de 9:30 a 15:30 horas (tiempo que se aprovechó para preparar el material en el laboratorio), y posteriormente se extrajo la muestra para su posterior análisis.

3.3.1 Radiación solar

Para el experimento se empleó un sensor de radiación solar KIMO Instruments[™] SL200, el cual se calibró para dar lecturas cada minuto, con el propósito de tener mediciones precisas.

Figura 18 Sensor de radiación solar

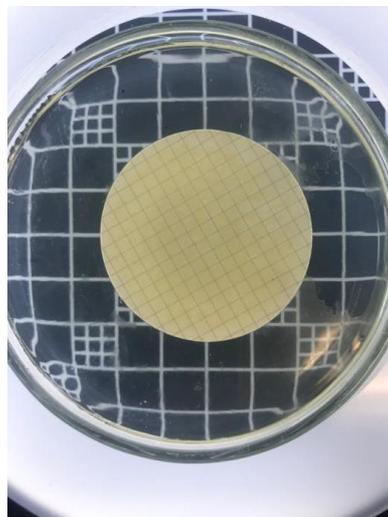


(Sánchez, 2018)

3.3.2 Coliformes fecales

De acuerdo a la NOM 127-SSA1-1994 "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano", se desarrolló el caldo de cultivo para detección de coliformes fecales a partir del kit Difco^{mr} m FC Agar

Figura 19 Caldo de cultivo de coliformes fecales



(Sánchez, 2018)

3.3.3 Coliformes termotolerantes

Igualmente, de acuerdo a la NOM 127-SSA1-1994, se desarrolló el caldo de cultivo para coliformes termotolerantes a partir del kit Difco^{mr} m EC Medium

Figura 20 Caldo de cultivo de coliformes termotolerantes

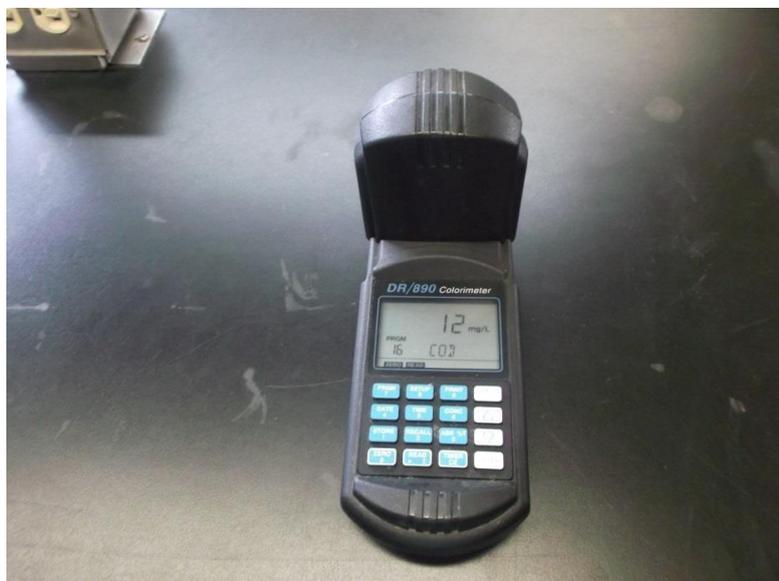


(Sánchez, 2018)

3.3.4 DQO

También se hizo la lectura DQO, donde de acuerdo a la NOM 127-SSA1-1994, se debía mantenerse en un rango no mayor a 3925 mg/L.

Figura 21 Turbidímetro



(Sánchez, 2018)

3.3.5 pH

En el pH del agua, de acuerdo a la NOM 127-SSA1- 1994, debía mantenerse en los límites permisibles, los cuales tienen un rango entre 6.5 a 8.5.

Figura 22 Sensor de pH



(Sánchez, 2018)

3.3.6 Nitratos

De acuerdo a la NOM 127-SSA1- 1994, se debía obtener un máximo de 10.0 mg/L para el nivel de nitratos.

Figura 23 Espectrofotómetro



(Sánchez, 2018)

3.4.6 Nitritos

Finalmente, para el nivel de nitritos, la NOM 127-SSA1- 1994 contemplaba un máximo de 1.0 mg/L.

Figura 24 Espectofotómetro



(Sánchez, 2018)

Con estos materiales, se pudo desarrollar adecuadamente el experimento. Es importante señalar que todos se encontraban en perfecta condición y que en todo momento se respetó el protocolo señalado en las NOM 127-SSA1- 1994 y NMX – AA – 102 – SCFI – 2006.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Fase 1

A continuación, se presenta una tabla donde se resumen los resultados obtenidos del experimento de toma municipal CONAGUA con respecto a los solicitados con la NOM-127-SSA1-1994. Donde el conteo de coliformes fecales y termotolerantes se tomó con variable dicotómica. Donde 0 equivale a ausencia y 1 a presencia de microorganismos:

Tabla 8 Resultados de la Fase 1 en comparación con los límites permisibles de la NOM 127 -SSA1- 1994.

Tiempo (horas)	Radiación solar promedio	Coliformes fecales	Coliformes termotolerantes	DQO mg/L	pH	Nitritos mg/L	Nitratos mg/L	Amoniaco mg/L
0	0	1	1	22.4	7.5	0.09	6.1	0.08
6	749	0	0	12.9	7.93	0.02	0.081	0.02
NOM	< 500 W/m²	0	0	0 a 30	6.5 a 8.5	1.0 max	10.0 max	0.5 max

(Sánchez, 2018)

De acuerdo a la evaluación de resultados, se puede concluir que el método SODIS fue efectivo para disminuir los parámetros de nitratos y la Demanda Química de Oxígeno; mientras que redujo el nivel de acidez del pH. Estabilizándola dentro de los límites permisibles citados en la NOM-127-SSA1-1994.

Con ello, se puede concretar que el agua de toma municipal CONAGUA, aprovechada con el método SODIS, dentro del sistema planteado, puede inferirse es potable para los parámetros que se evaluaron en esta investigación.

4.2 Fase 2

De igual manera, se realizó una tabla comparativa entre los valores resultantes del experimento de precipitación pluvial con relación a los valores marcados en la NOM-127-SSA1-1994.

En ellos, se puede apreciar que durante las primeras 4 horas de radiación, a pesar de que las lecturas disminuyen, no alcanzan los rangos solicitados; sin embargo, los valores obtenidos a las 6 horas de radiación continua son los adecuados para brindar la potabilización de la muestra:

Tabla 9 Resultados de la Fase 2 en comparación con los límites permisibles de la NOM 127 -SSA1- 1994.

Tiempo (horas)	Radiación solar promedio	Coliformes fecales	Coliformes termotolerantes	DQO mg/L	pH	Nitritos mg/L	Nitratos mg/L	Amoniaco mg/L
0	0	1	1	63.2	6.8	0.58	17.1	1.16
0	0	1	1	38.9	9.0	0.4	21.1	1.28
0	0	1	1	34.1	9.4	0.23	22.8	0.26
0	0	1	1	30.1	9.1	0.49	19.8	1.02
2	560	1	1	21.6	8.1	0.16	10.1	0.83
2	560	1	1	21.6	8.1	0.16	10.1	0.83
2	785	1	1	19.4	8.2	0.2	7.9	0.733
2	785	1	1	19.4	8.2	0.2	7.9	0.733
4	632	1	1	16.7	8.3	0.054	7.4	0.616
4	632	1	1	16.7	8.3	0.054	7.4	0.616
4	618	1	1	11.9	8.2	0.053	5.48	0.59
4	618	1	1	11.9	8.2	0.053	5.48	0.59
6	785	0	0	0.24	7.9	0.013	2.95	0.017
6	612	0	0	0.17	7.8	0.022	3.22	0.009
6	802	0	0	0.49	8.4	0.013	0.4	0.011
6	828	0	0	0.38	7.9	0.011	0.17	0.065
NOM	< 500 W/m²	0	0	0 a 30	6.5 a 8.5	1.0 max	10.0 max	0.5 max

(Sánchez, 2018)

Siendo así, se puede concluir que el agua de precipitación pluvial aprovechada con el método SODIS, dentro del sistema propuesto, es potable para los parámetros que se evaluaron en esta investigación.

4.3 Fase 3

Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos de la toma de agua del Humedal Artificial de San Juan de Aragón. A pesar de que en este caso los contaminantes fueron superiores a las dos fases anteriores, una vez radiada la muestra éstos descendieron considerablemente; mientras que el pH se neutralizó:

Tabla 10 Resultados de la Fase 3 en comparación con los límites permisibles de la NOM 127 -SSA1- 1994.

Tiempo (horas)	Radiación solar promedio	Coliformes fecales	Coliformes termotolerantes	DQO mg/L	pH	Nitritos mg/L	Nitratos mg/L	Amoniaco mg/L
0	0	1	1	81.4	5.9	4.9	31.4	2.6
6	780	0	0	26.9	8.3	0.054	0.082	0.07
NOM	< 500 W/m²	0	0	0 a 30	6.5 a 8.5	1.0 max	10.0 max	0.5 max

(Sánchez, 2018)



Una vez más, se puede comprobar que el método SODIS, aplicado en el sistema propuesto, es efectivo para potabilizar el agua del humedal, de acuerdo con los parámetros que se evaluaron en esta investigación.

4.4 Modelo matemático

Para avalar matemáticamente la eficiencia del sistema, se desarrollaron valores matemáticos sobre cada parámetro evaluado.

Como se mencionó anteriormente, el propósito del sistema consistió en lograr potabilizar el agua de toma municipal y el agua de precipitación pluvial. Desarrollando los modelos matemáticos (regresiones simples) sobre esta última fase.

Los modelos matemáticos se realizaron en el programa Statgraphics y todos representan un nivel de confianza del 99.995 %:

4.4.1 Amoniaco

$$\text{Amoniaco} = 0.968699 - 0.175508 * \text{Tiempo} + 0.000278105 * \text{Radiación}$$

Donde:

T= Tiempo (en horas)

R= Radiación (en W/m²)

4.4.2 pH

$$\text{pH} = 8.57588 - 0.0520706 * T - 0.000296294 * R$$

Donde:

T= Tiempo (en horas)

R= Radiación (en W/m²)

4.4.3 Nitritos

$$\text{Nitritos} = 0.408849 - 0.0450679 * T - 0.000205103 * R$$

Donde:

T= Tiempo (en horas)

R= Radiación (en W/m²)

4.4.4 Nitratos

$$\text{Nitratos} = 20.1577 - 1.60315 * T - 0.0117161 * R$$

Donde:

T= Tiempo (en horas)

R= Radiación (en W/m²)

4.4.5 DQO

$$\text{DQO} = 41.472 - 4.76874 * T - 0.0155619 * R$$

Donde:

T= Tiempo (en horas)

R= Radiación (en W/m²)

4.4.6 Coliformes

De acuerdo al análisis previo, los niveles de colonias de Coliformes fecales y Coliformes termotolerantes estuvieron relacionados en todo momento. De esta manera, se sacó un solo modelo matemático:

$$\text{Coliformes} = 1.07821 - 0.225134 * T + 0.00067605 * R$$

Donde:

T= Tiempo (en horas)

R= Radiación (en W/m²)

Resultado:

0= Sin presencia de colonias o no detectables

1= Con presencia de colonias

4.5 Aplicación del modelo matemático

Una vez obtenido el modelo matemático, se llevó a cabo una estimación para distintas zonas de México, para dar parámetros teóricos de efectividad de la tecnología ambiental y conocer, a través de la radiación solar en cada zona, el tiempo que debería ser radiada el agua para ser potable.

Para sectorizar el país en zonas de acuerdo al índice de radiación solar, se utilizó el modelo GIS del Programa de Asistencia para la Gestión del Sector Energético (Solar Atlas, 2017), sobre el cual se plantearon tres términos a nivel estatal de cantidad de radiación global en el país promedio anual:

- **Alto índice de radiación solar (1200 w/m² – mayor):** Baja California, Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Sinaloa, Nayarit, Durango, Zacatecas.
- **Mediano índice de radiación solar (1200 w/m² –780 w/m²):** Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Guerrero, Oaxaca, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Ciudad de México, Tlaxcala, Puebla, Estado de México, Morelos.
- **Bajo índice de radiación solar (700 w/m² – menor):** Veracruz, Chiapas, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo.

A su vez, se eligió un estado por cada término para aplicar el modelo matemático y generar un resultado teórico sobre el número de horas que se requieren para, aprovechando la radiación solar existente, potabilizar el agua.

4.5.1 Alto índice de radiación solar

Se eligió el estado de Coahuila para aplicar el modelo matemático al tratarse de un estado que mantiene sus índices de radiación solar estables a lo largo del año, oscilando la radiación entre los 1280 y los 1220 w/m². Se tomó el promedio (1250 w/m²) y se aplicó el modelo:

Amoniaco (Max 0.5)

$$\text{Amoniaco} = 0.968699 - 0.175508 * \text{Tiempo} + 0.000278105 * \text{Radiación}$$

Tabla 11 Evolución de amoniaco en alto índice de radiación solar

Contaminantes	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
1.17559	1	1250
1.00008	2	1250
0.82457	3	1250
0.64906	4	1250
0.47355	5	1250

(Sánchez, 2019)

pH (6.5 – 8.5)

$$\text{pH} = 8.57588 - 0.0520706 * T - 0.000296294 * R$$

Tabla 12 Evolución de pH en alto índice de radiación solar

Nivel de acidez	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
8.12	1	1250
8.06	2	1250
8.01	3	1250
7.96	4	1250
7.91	5	1250

(Sánchez, 2019)

Nitritos (Máximo 1.0)

$$\text{Nitritos} = 0.408849 - 0.0450679 * T - 0.000205103 * R$$

Tabla 13 Evolución de nitritos en alto índice de radiación solar

Contaminante	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
0.08	1	1250
0.04	2	1250
0.00	3	1250
0.00	4	1250
0.00	5	1250

(Sánchez, 2019)

Nitratos (Máximo 10.0)

$$\text{Nitratos} = 20.1577 - 1.60315 * T - 0.0117161 * R$$

Tabla 14 Evolución de nitratos en alto índice de radiación solar

Contaminante	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
2.44491	1	1250
0.84176	2	1250
0.00	3	1250
0.00	4	1250
0.00	5	1250

(Sánchez, 2019)

DQO (Máximo 30.0)

$$DQO = 41.472 - 4.76874 * T - 0.0155619 * R$$

Tabla 15 Evolución de DQO en alto índice de radiación solar

Contaminante	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
34.56	1	1250
29.79	2	1250
25.03	3	1250
20.26	4	1250
15.49	5	1250

(Sánchez, 2019)

Coliformes fecales y termotolerantes (Sin presencia de colonias o no detectables= 0)

$$\text{Coliformes} = 1.07821 - 0.225134 * T + 0.00067605 * R$$

Tabla 16 Evolución de coliformes fecales y termotolerantes en alto índice de radiación solar

Contaminante	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
1	1	1250
1	2	1250
0	3	1250
0	4	1250
0	5	1250

(Sánchez, 2019)

Como se puede ver en las tablas anteriores, los nitritos, nitratos, DQO y coliformes fecales y termotolerantes son aptos para consumo humano después de radiar el agua durante 3 horas; sin embargo, para el amoniaco y pH se requiere de 5 horas de exposición solar.

De esta manera, se concluye que el modelo matemático aplica en la región de alto índice de radiación solar y es efectivo en un plazo de 5 horas.

4.5.2 Mediano índice de radiación solar

Para la zona de radiación media anual, se optó por aplicar el modelo matemático en el estado de Hidalgo. La radiación se encontró en el rango entre los 1200 y los 900 w/m²; dando una media de 1050 w/m²:

Amoniaco (Max 0.5)

$$\text{Amoniaco} = 0.968699 - 0.175508 * \text{Tiempo} + 0.000278105 * \text{Radiación}$$

Tabla 17 Evolución de amoniaco en mediano índice de radiación solar

Contaminantes	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
1.08520	1	1050
0.90969	2	1050
0.73419	3	1050
0.55868	4	1050
0.38317	5	1050
0.20766	6	1050

(Sánchez, 2019)

pH (6.5 – 8.5)

$$\text{pH} = 8.57588 - 0.0520706 * T - 0.000296294 * R$$

Tabla 18 Evolución de pH en mediano índice de radiación solar

Nivel de acidez	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
8.21	1	1050
8.16	2	1050
8.11	3	1050
8.06	4	1050
8.00	5	1050
7.95	6	1050

(Sánchez, 2019)

Nitritos (Máximo 1.0)

$$\text{Nitritos} = 0.408849 - 0.0450679 * T - 0.000205103 * R$$

Tabla 19 Evolución de nitritos en mediano índice de radiación solar

Contaminante	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
0.15	1	1050
0.10	2	1050
0.06	3	1050
0.01	4	1050
0.00	5	1050
0.00	6	1050

(Sánchez, 2019)

Nitratos (Máximo 10.0)

$$\text{Nitratos} = 20.1577 - 1.60315 * T - 0.0117161 * R$$

Tabla 20 Evolución de nitratos en mediano índice de radiación solar

Contaminante	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
6.25265	1	1050
4.64950	2	1050
3.04635	3	1050
1.44320	4	1050
0.15996	5	1050
0	6	1050

(Sánchez, 2019)

DQO (Máximo 30.0)

$$\text{DQO} = 41.472 - 4.76874 * T - 0.0155619 * R$$

Tabla 21 Evolución de DQO en mediano índice de radiación solar

Contaminante	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
35.07	1	1050
30.30	2	1050
25.53	3	1050
20.76	4	1050
15.99	5	1050
11.23	6	1050

(Sánchez, 2019)

Coliformes fecales y termotolerantes (Sin presencia de colonias o no detectables= 0)

$$\text{Coliformes} = 1.07821 - 0.225134 * T + 0.00067605 * R$$

Tabla 22 Evolución de coliformes fecales y termotolerantes en mediano índice de radiación solar

Contaminante	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
1	1	1050
1	2	1050
1	3	1050
0	4	1050
0	5	1050
0	6	1050

(Sánchez, 2019)

De acuerdo al modelo matemático, teóricamente en las primeras 5 horas, la mayoría de los contaminantes disminuirían o se neutralizarían, siendo aptos para el consumo humano; sin embargo, los nitritos entrarían en el umbral de efectividad hasta las 6 horas.

De esta manera, le comprueba algorítmicamente el experimento, comprobando su validez eficiencia.

4.5.3 Bajo índice de radiación solar

Finalmente, se empleó el modelo matemático en el estado de Chiapas, mismo que entró en un índice de radiación solar promedio anual entre 760 y 650 w/m²; con una media de 705 w/m²:

Amoniaco (Max 0.5)

$$\text{Amoniaco} = 0.968699 - 0.175508 * \text{Tiempo} + 0.000278105 * \text{Radiación}$$

Tabla 23 Evolución de amoniaco en bajo índice de radiación solar

Contaminantes	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
0.98926	1	705
0.81375	2	705
0.63824	3	705
0.46273	4	705
0.28722	5	705
0.11172	6	705

Tabla 23. Evolución de amoniaco en bajo índice de radiación solar. (Sánchez, 2019)

pH (6.5 – 8.5)

$$\text{pH} = 8.57588 - 0.0520706 * T - 0.000296294 * R$$

Tabla 24 Evolución de pH en bajo índice de radiación solar

Nivel de acidez	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
8.31	1	705
8.26	2	705
8.21	3	705
8.16	4	705
8.11	5	705
8.05	6	705

(Sánchez, 2019)

Nitritos (Máximo 1.0)

$$\text{Nitritos} = 0.408849 - 0.0450679 * T - 0.000205103 * R$$

Tabla 25 Evolución de nitritos en bajo índice de radiación solar

Contaminante	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
0.22	1	705
0.17	2	705
0.13	3	705
0.08	4	705
0.04	5	705
0.00	6	705

(Sánchez, 2019)

Nitratos (Máximo 10.0)

$$\text{Nitratos} = 20.1577 - 1.60315 * T - 0.0117161 * R$$

Tabla 26 Evolución de nitratos en bajo índice de radiación solar

Contaminante	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
10.29470	1	705
8.69155	2	705
7.08840	3	705
5.48525	4	705
3.88210	5	705
2.27895	6	705

(Sánchez, 2019)

DQO (Máximo 30.0)

$$\text{DQO} = 41.472 - 4.76874 * T - 0.0155619 * R$$

Tabla 27 Evolución de DQO en bajo índice de radiación solar

Contaminante	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
35.61	1	705
30.84	2	705
26.07	3	705
21.30	4	705
16.53	5	705
11.76	6	705

(Sánchez, 2019)

Coliformes fecales y termotolerantes (Sin presencia de colonias o no detectables= 0)

$$\text{Coliformes} = 1.07821 - 0.225134 * T + 0.00067605 * R$$

Tabla 28 Evolución de coliformes fecales y termotolerantes en bajo índice de radiación solar

Contaminante	Tiempo (hrs)	Radiación (w/m ²)
1	1	705
1	2	705
1	3	705
1	4	705
1	5	705
0	6	705

Tabla 28. Evolución de Coliformes fecales y termotolerantes en bajo índice de radiación solar. (Sánchez, 2019)

En ésta última aplicación de modelo teórico para índice de radiación solar baja, se presentó que los últimos valores de contaminantes para consumo humano se obtienen transcurridas las 6 horas de radiación; mismo tiempo que el índice de radiación medio, resolviendo así, teóricamente, la eficiencia SODIS en México.

CONCLUSIONES

5.1 Generales

5.1.1 Radiación solar

La investigación permitió comprobar los estudios previos sobre el método SODIS. Entre ellos destaca la importancia de la radiación solar para eliminar los microorganismos del agua. Comprobando así, que se requiere de una radiación solar mínima de 500 W/m^2 con una exposición de 6 horas.

Además, es importante destacar que en la Ciudad de México se cuenta con un índice de radiación superior al mencionado en los estudios anteriores; permitiendo que el método SODIS trabaje exitosamente.

5.1.2 Agua

El agua que se empleó en el sistema (de toma municipal, precipitación pluvial y humedal) fue exitosamente tratada, haciendo que el método SODIS sea efectivo en diversos niveles de contaminación.

Sin embargo, es importante aclarar que para que el método tenga mejor efecto en el líquido, se aconseja que éste sea previamente tratado. El método SODIS fue efectivo para remover microorganismos; pero en el caso de minerales y metales pesados es necesario removerlos mediante filtros previos a la radiación.

El método permite la nivelación de la acidez y alcalinidad del agua, permitiendo que ésta se encuentre en los límites permisibles para consumo humano.

5.1.3 SODIS

El método de radiación solar para desinfección (SODIS) es un método efectivo, sencillo, económico y ecológico para amortiguar la huella ecológica con la capacidad de reducir sistemas convencionales de potabilización: hervir, clorar y radiar artificialmente el líquido.

El método es una alternativa para brindar agua potable segura y accesible para la población que habite en países con un buen asoleamiento (una radiación solar superior a 500 W/m^2).

5.2 Particulares

5.2.1 Objetivos

Se demostró exitosamente que la incidencia de radiación solar sobre la Ciudad de México tiene el potencial para eliminar microorganismos en el agua. Permitiendo que mediante el sistema desarrollado, se pudieran integrar aguas contaminadas a la arquitectura y llegar al máximo grado de limpieza: la potabilización.

5.2.2 Hipótesis

Se comprobó que una tecnología ambiental pueda brindar agua potable a partir de sistemas pasivos de tratamiento y utilizando energías renovables para potabilizar agua.

Además, se diseñó y construyó un sistema modular que permite su adecuación en la arquitectura, dando paso así, a desarrollar una instalación potabilizadora.

La eficiencia del método SODIS permitió que se demostrara que el ser humano puede potabilizar agua con una menor huella ecológica que la existente por los sistemas tradicionales. Permitiendo así, que la tecnología ambiental sea amigable con el medio ambiente.

5.2.3 Sistema

Los 2.3 litros de agua que el sistema almacenó y que diariamente puede potabilizar, son suficientes para dar abasto a una persona sin riesgo alguno.

La morfología de la tecnología desarrollada permite una sencilla integración modular a un sistema complejo, facilitando su integración a una edificación.

Los materiales con los que se construyó el sistema son diseñados para exteriores, permitiendo que el mismo tenga una vida útil extendida; amortiguando así su obsolescencia programada y contribuyendo a reducir la huella ecológica.

El tamaño y resistencia del sistema es adecuado para que éste sea trasladado sin dificultad, permitiendo que pueda ser enviado a diversos lugares con urgencia inmediata de agua potable, sin necesidad de equipo especial y aprobándolo como accesible.

Al tratarse de un sistema sencillo, con piezas móviles comerciales, materiales de fácil acceso y no requerir de mano de obra capacitada para su ensamblaje e instalación, permitiendo que su adquisición sea económica.

5.3 Perspectivas de la investigación

5.3.1 México

El sistema fue exitoso al tratar el agua de la toma municipal CONAGUA que abastece a la Ciudad de México y Área Metropolitana; de igual manera al eliminar los contaminantes del agua de lluvia y del humedal artificial de San Juan de Aragón; sin embargo, se propone continuar evaluando tanto la tecnología ambiental desarrollada como el sistema en otras regiones del país.

En dicha propuesta, y de ser exitoso el tratamiento, se invita a aprovechar el agua de acuíferos CON LA PRECACUCIÓN de no explotarlos. Necesariamente debe preverse y valorarse un ecosistema antes de utilizarlo como un medio para obtención de agua.

5.3.2 El mundo

A pesar de que el método SODIS ha sido valorado en diversos países, es necesario darle mejor divulgación para que éste sea reconocido por más personas y se logre evitar la mortandad por falta de agua potable.

6. BIBLIOGRAFÍA

Arnold, M., et al, (1998). Introducción a los conceptos básicos de la teoría general de sistemas
Cinta moebio.

Arriaga, L., V. Aguilar y J. Alcocer-Durand (200), Aguas continentales y diversidad biológica de
México. México: Conabio.

Carabias, J. y R. Landa. (2005), Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los
recursos hídricos en México. Universidad Nacional Autónoma de México, El Colegio de México
y Fundación Gonzalo Río Arronte. México.

De Albuquerque, C., (2010). Manual del activista sobre el derecho al agua y al saneamiento.
Reino Unido: Freshwater Action Network

Dessie, A., et al, (2014), Solar disinfection: an approach for low-cost household water treatment
technology in Southwestern Ethiopia, Journal of Environmental Health Science and Engineering.

DOF. NOM-059-SEMARNAT-2001. (2002), Diario Oficial de la Federación. México.

Eccosfera, (2014). MÉXICO ES EL 3ER PAÍS MÁS SOLEADO DEL MUNDO (PERO PRODUCE MÍNIMA
ENERGÍA SOLAR) <http://ecoosfera.com/2014/09/mexico-es-el-3er-pais-mas-soleado-del-mundo-pero-produce-minima-energia-solar/> Fecha de consulta: 4-12-2017.

FNUAP. (2001), El estado de la población mundial 2001. Huellas e hitos: población y cambio del
medio ambiente. Fondo de Población de las Naciones Unidas.

Fernández I, Pilar, (2010). Proceso de fotocatalisis solar para detoxificación y descontaminación
de aguas. Centro de investigaciones energéticas medioambientales y tecnológicas (CIEMAT),
Almería, España

Global Solar Atlas. (2016). <http://globalsolaratlas.info/?c=40.446947,-51.503906,4> Fecha de
consulta: 4-12-2017.

González F., Lartigue C., (2016). Derecho humano al agua en los contextos mexicanos. México.

Gutiérrez, C., et al, (2006), Desinfección foto-catalítica del agua para consumo humano usando luz solar y dióxido de titanio (tio₂) inmovilizado, Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro.

Inzunza, J, (2004), Meteorología descriptiva, Chile: Universidad de Concepción.

Lawand, T. et al, (1988), Solar Water Desinfection. Proceedings of a korkshop held at thebrace research institute, Montreal, Canadá: Brace Research Institute, the International Development Research Centre, and the United Nations University.

Luzi, S., et al, (2016), SODIS manual Guidance on solar water disinfection, Switzerland, Suiza, eawag aquatic research.

Malato, S., et al, (2016), Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: The pilot plants of the Plataforma Solar de Almeria, Almeria, España, ELSEVIER.

Murinda, S. Kraemer, S., (2008), The potential of solar wáter disinfection as a household wáter treatment method in peri-urban Zimbabwe, Epworth, Zimbabwe: ELSEVIER.

Oates, P., et al, (2003), Solar Solar disinfection (SODIS): simulation of solar radiation for global assessment and application for point-of-use water treatment in Haiti : PERGAMON.

OCDE. (1998), Análisis del desempeño ambiental: México: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. Francia.

OECD. (2003), Water. Performance and Challenges in OECD Countries. Environmental Performance Reviews.

O'Neil, G., (1979), Ciudades del Espacio, Barcelona, España: Bruguera.

OMS, et al., (2003), Índice UV Solar Mundial.

ONU. (2008), Objetivos de Desarrollo del Milenio. Informe 2008. Estados Unidos de América.

PEMBU, consultada en noviembre de 2017
http://www.ruoa.unam.mx/pembu/datos_historicos.html Fecha de consulta: 22-11-2017.

PNUMA. (2003), GEO América Latina y el Caribe. Perspectivas del Medio Ambiente 2003.
 PNUMA. Costa Rica.

Quirós R, Elia, (2014), Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil,
 Universidad de Extremadura, Cáceres, España.

Reyna B., A. y J. C. Hernández E. (2006), Poblamiento, desarrollo rural y medio ambiente. Retos
 y prioridades de la política de población. Conapo. Disponible en:
www.conapo.gob.mx/publicaciones/sdm2006/sdm06_12.pdf Fecha de consulta 17-11- 2017.

Schertertenleib, R. et al, (2002), Solar Water Sisinfection A guide for the applicaton of SODIS,
 Switzerland, Suiza, SANDEC (water and Sanitation in Developing Countries) and EAWAG (Swiss
 Federal Institute for Enviromental Science and Technology).

Sciacca, F., et al, (2010), Dramatic enhancement of solar disinfection (SODIS) of wild Salmonella
 sp. In PET bottles by H2O2 addition on natural water of Burkina Faso containing dissolved iron,
 Ouagadougou, Burkina Faso: ELSEVIER

Semarnat. (2005), Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2005. México:
 Compendio de Estadísticas Ambientales.

SEMARNAT, (2008), Informe de la situación del medio ambiente en México, Compendio de
 estadísticas ambientales, México.

Tejeda M., et al., (2015), Prontuario Solar de México, México: Universidad de Colima –
 Universidad Veracruzana.

Van der Valk, M., (2011). The right to wáter and wáter rights in a changing world: Delft, Países
 Bajos.

Villaseñor-Talavera, R. (2002), Mecanismos para la regulación y control de la pesca. En: Morán-Angulo, R. E., S. Santos-Guzmán, M. T. Bravo- Mercado y J. R. Ramírez-Zavala (Eds.). Manejo de recursos pesqueros. Reunión Temática Nacional. México: Universidad Autónoma de Sinaloa.

Vörösmarty, C., C. Lévêque, C. et al., (2005). Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends, Volume 1. Millennium Ecosystem Assessment Series. Island Press. Washington, 323 Covelo, London.

WHO, (2004). Water, sanitation and hygiene links to health. Facts and Figures updated November. World Health Organization. Disponible en: www.who.int/water_sanitation_health/publications/en/ Fecha de consulta: 16-11-2017.

WHO y UNICEF, (2008). Joint Monitoring Programme (JMP) for water supply and sanitation. Disponible en: www.wssinfo.org/en/welcome.html Fecha de consulta: 20-11- 2017.

WHO y UNICEF, (2004). Meeting the MDG Drinking Water and Sanitation Target: A Mid- term Assessment of Progress. WHO. Geneva, New York.

7. APÉNDICES

7.1 Material y suministros

A continuación, se desglosan los suministros y materiales empeladas para llevar a cabo la etapa de experimentación de la investigación. Todo ello de acuerdo a los parámetros citados en la NMX – AA – 102 – SCFI – 2006, y la NOM – 127 – SSA1 – 1994.



Medios de cultivo para Coliformes Fecales y Coliformes Termotolerantes:
 ° Difco^{mr} m FC Agar
 ° Difco^{mr} m EC Medium



Reactivos de evaluación:
 ° Hach^{mr} TNT 822 DQO
 ° Hach^{mr} TNT 830 amoniaco
 ° Hach^{mr} TNT 839 Nitrito
 ° Hach^{mr} TNT 835 Nitrato



Sensor de radiación solar KIMO Instruments^{mr} SL200, calibrado a generar lecturas cada minuto.



Termoreactor Hach^{mr} DRB200 para la preparación de muestras de materia orgánica e inorgánica.



Colorímetro Hach^{mr} DR/890 para la medición de muestras de materia orgánica e inorgánica.



Turbidímetro La Motte^{mr} 2020We para determinar el índice de partículas en la muestra.



Medidor de pH OAKTON^{mr} 510, para medir el índice de acidez de la muestra.



El espectrofotómetro Hach^{mr} DR3900 para medir las muestras de nitratos, nitritos y amoniaco.



Autoclave Corpor^{mr} SU ML para esterilizar el material



Bomba de vacío Millipore^{mr} WP6111560 para extraer el agua de las colonias de coliformes fecales y coliformes termotolerantes.



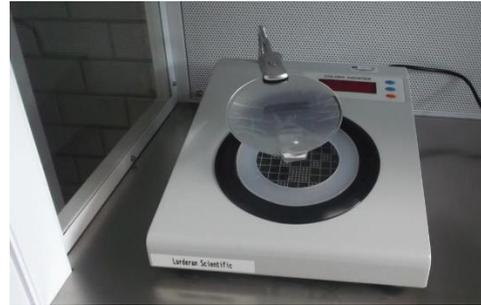
Balanza analítica OHAUS^{mr} PA224C para medir el peso de los medios de cultivo.



Campana de flujo laminar AIREsteril^{mr} Para la elaboración de cultivos y conteo de colonias.



Incubadoras BINDER^{mr} BD53-UL para el cultivo de coliformes fecales y coliformes termotolerantes durante 24 y 48 horas, respectivamente.



Cámara de colonias para realizar la lectura de colonias de coliformes fecales y coliformes termotolerantes

8. ANEXOS

8.1 Protocolo de experimentación

A continuación, se describe el protocolo que se siguió para desarrollar la etapa de experimentación de la investigación. Misma que se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental en el Centro Tecnológico de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM; de acuerdo a lo establecido en la NMX – AA – 102 – SCFI – 2006, Calidad de agua – Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y Escherichia coli Pesuntiva – Método de filtración en membrana (Cancela a la NMX – AA – 102 – 1987) y la NOM – 127 – SSA1 – 1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a los que debe someterse el agua para su potabilización.

Toma de muestra

Las muestras se guardaron inmediatamente después de su adquisición, en las 3 Fases del experimento, en bolsas estériles y se refrigeraron inmediatamente a 2°C para ser utilizadas posteriormente.

De igual manera, el resguardo de las muestras nunca excedió las 72 horas.

Material

Todo el material fue envuelto en papel de estraza para ser introducido en la autoclave. Ésta se cerró y se calentó a 150 °C durante 15 minutos. Posteriormente, se abrió la válvula y se esperó 1 hora para recuperar el material.

Figura 25 Esterilización de material en campana de flujo laminar



(Sánchez, 2018)

Posteriormente, éste se colocó en la Campana de Flujo Laminar y se radió con radiación Ultra Violeta durante 10 minutos. Tiempo que se abandonó y cerró el laboratorio.

Posteriormente, y ya esterilizado el material, se procedió a utilizarlo.

Reactivos

Para los reactivos de las tomas de DQO, Nitritos, Nitratos y Amoniaco, se tuvo la precaución de revisar que los mismos no estuvieran caducados. De igual manera, se siguió en todo momento las indicaciones de uso.

Para los caldos de cultivo se revisó que las etiquetas marcaran vigente la fecha de caducidad.

La realización del caldo se desarrolló agregando 200 mililitros de agua a la parrilla eléctrica calentando ésta a 150°C.

Figura 26 Preparación de caldos de agar para coliformes fecales y termotolerantes



(Sánchez, 2018)

Durante el transcurso, se pesó en una balanza analítica el gramaje exacto para agregarlo al líquido. Mismo que previamente entró en ebullición y se apagó la parrilla.

Se agitó la mezcla durante un minuto y se trasladó a la campana de flujo laminar. Donde se vertió el caldo en las Cajas de Petri.

Filtrado

Para la preparación de colonias de coliformes fecales y coliformes termotolerantes e realizó el método de filtrado por membrana descrito en la NMX – AA – 102 – SCFI – 2006. Donde se llevó a la campana de flujo laminar las muestras y se vertieron en el sistema de membrana 100 mililitros de la muestra.

Posteriormente se empleó la bomba de succión para filtrar el agua y empapar la membrana.

Finalmente se tomó con unas pinzas de disección la membrana y se colocó sobre el caldo.

Figura 27 Preparación de caldos para coliformes fecales y coliformes termotolerantes



(Sánchez, 2018)

Seguridad

En todo momento se empleó zapato cerrado, bata de laboratorio, guantes de cirujano y cubrebocas.