

**PROTOTIPO PARA LA DESINFECCIÓN DEL AGUA POR EL MÉTODO DE
DESINFECCIÓN SOLAR (SODIS)**

PRESENTADO POR:

**LADY ANGELICA MARTINEZ
COD.2106723**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
ANTEPROYECTO DE GRADO
BOGOTÁ D.C.
2015**

**PROTOTIPO PARA LA DESINFECCIÓN DEL AGUA POR EL MÉTODO DE
DESINFECCIÓN SOLAR (SODIS)**

PRESENTADO POR:

**LADY ANGÉLICA MARTÍNEZ
COD.2106723**

DIRECTOR

**Juan José Vargas Osorio
Ing. Ambiental y Sanitario
MSc. Economía del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales**

CODIRECTOR

**Juan Carlos Torres Fernández
Químico**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2015**

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres que me apoyaron y me impulsaron a lo largo de la carrera y en especial durante todo el proceso de desarrollo del proyecto, a mi padre Jorge quien fue el que me apoyó en la construcción del prototipo sin su ayuda no lo hubiera logrado, a mi madre Alicia quien con sus palabras de aliento logró darme el apoyo necesario para desarrollar adecuadamente cada fase del proyecto y a mi hermana Laura que estuvo presente y me ayudo en gran parte del proceso.

Agradezco también a mis familiares y amigos que estuvieron presentes y me ayudaron de una forma u otra a lograr cumplir este gran objetivo, quiero mencionar especialmente a Juan Diego Martínez y Santiago Munevar quienes me ayudaron en la elaboración del diseño del prototipo.

Por último, pero no menos importantes quiero dar especial agradecimiento a Juan José Vargas y a Juan Carlos Torres por trabajar junto a mí y dirigir mis pasos durante todo el proyecto, espero haber aportado muchas cosas a su vida profesional y personal así como ellos lo hicieron conmigo.

A todos ustedes gracias.

Contenido

1. DEFINICIONES	9
2. RESUMEN.....	10
3. INTRODUCCIÓN.....	11
4. OBJETIVOS.....	13
4.1. OBJETIVO GENERAL	13
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
5. MARCO TEÓRICO	14
5.1. ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS	14
5.1.1. Características de los microorganismos	15
5.1.2. Persistencia de los microorganismos	15
5.2. DESINFECCIÓN DEL AGUA	16
5.3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA QUEBRADA LA VIEJA	21
5.4. PROTOTIPOS SOLARES PRELIMINARES	21
5.4.1. Árbol solar.....	22
5.4.2. Árbol eólico.....	22
5.5. FILOTÁXIS.....	23
5.5.1. Filotáxis alterna dística.....	23
5.5.2. Filotáxis alterna helicoidal.....	24
5.5.3. Filotáxis verticalada.....	24
5.5.4. Filotáxis descusada.....	24
5.6. SUCESIÓN DE FIBONACCI	25
6. MARCO METODOLÓGICO	26
6.1 FASES – PASO A PASO	26
6.2 MÉTODO.....	28
7. DESARROLLO CENTRAL.....	29
7.1. FASE 1: Identificación de variables dependientes e independientes a partir de experimentos previos.....	29
7.1.1. Potencial solar disponible	29
7.1.2. Descripción del comportamiento solar en el lugar de instalación	30
7.1.3. Selección de material (contenedor de agua)	32
7.1.4 Turbiedad del agua	33
7.5. FASE 2: Experimentación.....	34
7.2.1. Puntos de muestreo	34
7.2.2. Equipos	34
7.2.3. Unidades.....	36

7.2.4.	Pruebas en laboratorio- Bacterias del acuario y la quebrada	36
7.6.	FASE 3: Diseño del prototipo de desinfección solar	43
7.3.1.	Determinación de las dimensiones del prototipo (árbol) de desinfección solar	43
7.3.2.	Dimensiones de los paneles	45
7.7.	FASE 4: Construcción y pruebas del prototipo	46
7.7.3.	Instalación	47
7.7.5.	Pruebas con <i>Escherichia Coli</i>	51
7.7.6.	Pruebas del tratamiento en campo.....	52
7.7.7.	Aplicación de modelos fenomenológicos	55
8.	IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO	64
9.	CONCLUSIONES	65
10.	RECOMENDACIONES	66
11.	REFERENCIAS	67

Índice de imágenes

IMAGEN1: CONCENTRADOR SOLAR Y BOTELLAS PET	18
IMAGEN2: CONCENTRADOR RECTANGULAR CON CUATRO REFLECTORES (LÁMINAS DE ALUMINIO).....	19
IMAGEN3: REFLECTORES, A) PARABÓLICO COMPUESTO, B) PARABÓLICO Y C) FORMA DE V.....	19
IMAGEN 4: DIFERENTES REACTORES DE DESINFECCIÓN SOLAR A) BOTELLAS DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) B Y C) TUBOS DE VIDRIO DE BOROSILICATO Y D) TUBOS DE METALCRILATO.	20
IMAGEN 5: DIMENSIONES DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN POR MÉTODO SODIS	21
IMAGEN 6: LOS DOS MODELOS DE COLECTOR SOLAR.....	22
IMAGEN 7: “WIND TREE” AEROGENERADOR EN FORMA DE ÁRBOL	22
IMAGEN 8: FILOTÁXIS DÍSTICA	24
IMAGEN9: FILOTÁXIS HELICOIDAL.....	24
IMAGEN 10: FILOTÁXIS VERTICALADA	24
IMAGEN 11: FILOTÁXIS DESCUSADA	25
IMAGEN 12: PUNTO DE MUESTREO QUEBRADA LA VIEJA.....	34
IMAGEN 13: LAMOTTE SMART SPECTRO SPECTROPHOTOMETER 2000-1.....	35
IMAGEN 14: TURBIDÍMETRO HI 88713- 02	36
IMAGEN 15: DILUCIONES SERIADAS.....	38
IMAGEN 16: EXPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS A LÁMPARA UV UBICADA EN LOS LABORATORIOS DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.....	39
IMAGEN 17: ESTRUCTURA PRINCIPAL DEL PROTOTIPO (ÁRBOL) DE DESINFECCIÓN SOLAR.....	44
IMAGEN18: BASE DE LA “HOJA” QUE SOPORTA EL PESO DEL CONTENEDOR DE AGUA Y LA LÁMINA QUE REFLEJA LA RADIACIÓN.	45
IMAGEN19 DISEÑO FINAL DEL PROTOTIPO DE DESINFECCIÓN SOLAR	46
IMAGEN 20: PROTOTIPO DE DESINFECCIÓN ARMADO SEGÚN MEDIDAS DE DISEÑO. ..	46

Índice de tablas

TABLA 1: ENFERMEDADES RELACIONADAS CON BACTERIAS PRESENTES EN EL AGUA	14
TABLA 2: INTENSIDAD LUMÍNICA EN LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE CENTRAL 2016.	30
TABLA 3: TRAYECTORIA DIARIA DEL SOL UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.	32
TABLA 4: COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE ABSORBANCIA DE CADA MATERIAL EN EL RANGO DE LONGITUD DE ONDA DE 200-290NM.....	33
TABLA 5: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS VALORES DE TURBIEDAD ARROJADOS POR EL TURBIDÍMETRO.	33
TABLA 6: COMPARACIÓN ENTRE MATERIALES PARA EL SOPORTE DE “LA HOJA” QUE SERÁ LA BASE DEL CONTENEDOR DE AGUA Y LA LÁMINA REFLECTORA.	45
TABLA 7: DIMENSIONES DE LAS PARTES DEL PROTOTIPO DE DESINFECCIÓN SOLAR	46
TABLA 8: DIMENSIONES DE CONSTRUCCIÓN DE LAS VARILLAS (RAMAS).....	47
TABLA 9: APLICACIÓN DEL MODELO DE DECAIMIENTO MICROBIANO.....	57
TABLA 10: DESCRIPCIÓN DEL AJUSTE DE LOS MODELOS FENOMENOLÓGICOS A LOS RESULTADOS DE LAS MUESTRAS DEL PROYECTO.	63

Índice de gráficas

GRÁFICA 1: NÚMERO DE HORAS DE BRILLO SOLAR ANUAL EN BOGOTÁ D.C.....	30
GRÁFICA 2: PROMEDIO DE RADIACIÓN GLOBAL EN BOGOTÁ D.C AÑO 2015	31
GRÁFICA 3: PROMEDIO MENSUAL DE TEMPERATURAS EN BOGOTÁ DICIEMBRE 2016.....	31
GRÁFICA 4: DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA BASE DURANTE TODO EL PROCESO DE MUESTREO.	37
GRÁFICA 5: CURVA DE CALIBRACIÓN (ABSORBANCIA VS UNIDADES FORMADORAS DE COLONIA (UFC))	38
GRÁFICA 6: RESULTADOS DEL PROCESO DE DESINFECCIÓN UTILIZANDO LÁMPARA UV.	40
GRÁFICA 7: RESULTADOS DE SUPERVIVENCIA TOMANDO COMO REFERENCIA AGUA DESTILADA TENIENDO EN CUENTA LA POBLACIÓN RESTANTE.	41
GRÁFICA 8: COMPORTAMIENTO DE LA SUPERVIVENCIA BACTERIANA DESPUÉS DE 24 HORAS SIN EXPOSICIÓN	41
GRÁFICA 9: COMPORTAMIENTO DE SUPERVIVENCIA CON PULSOS DE RADIACIÓN INICIANDO EN 20(S)	42
GRÁFICA 10: COMPARACIÓN ENTRE PRUEBAS CON TAPONES HUECOS Y TAPONES CON RESINA	42
GRÁFICA 11: CALIBRACIÓN ABSORBANCIA VS UFC/ML (E.COLI) APLICANDO MÉTODO DE DILUCIONES SERIADAS.	52
GRÁFICA 12: RESULTADOS PRIMER MUESTREO (NUBLADO)	53
GRÁFICA 13: SEGUNDO MUESTREO DEL PROCESO DE DESINFECCIÓN EN CAMPO, CON PRESENCIA DE PERÍODOS SOLEADOS.....	53
GRÁFICA 14: RESULTADOS TERCER MUESTREO DEL TRATAMIENTO CON VALORES ALTOS DE INTENSIDAD LUMÍNICA.	55
GRÁFICA 15: AJUSTE DATOS DE EXPOSICIÓN EN LABORATORIO A $7,738 \mu\text{W}/\text{CM}^2$ - MODELO DECAY	58
GRÁFICA 16: AJUSTE DATOS DE EXPERIMENTO EN LABORATORIO A $7,738 \mu\text{W}/\text{CM}^2$ APLICANDO EL MODELO “DOS ETAPAS”	59
GRÁFICA 17: AJUSTE DEL MODELO DE WEIBULL APLICADO A LOS RESULTADOS DEL SEGUNDO MUESTREO REALIZADO EN CAMPO.....	60
GRÁFICA 18: AJUSTE MUESTRA 3 EN CAMPO- MODELO DE WEIBULL	61
GRÁFICA 19: AJUSTE DEL MODELO DE WEIBULL APLICADO A LOS RESULTADOS DEL CUARTO MUESTREO REALIZADO EN CAMPO	62
GRÁFICA 20: MODELO DE WEIBULL	80

1. DEFINICIONES

- **Filotáxis:** Comportamientos en la disposición de hojas sobre el tallo
- **Medio de cultivo:** Consta de una solución (gel) que contiene los nutrientes necesarios para permitir el crecimiento de microorganismos, virus, células, tejidos vegetales etc.
- **Termodurecible:** Polímero que tiene macromoléculas que, por la acción del calor, se unen por enlace químico formando un material insoluble y que no puede ser fundido.
- **Absorbancia:** Se define como la relación (logarítmica) entre la intensidad de la luz que incide sobre una muestra y la intensidad de esa misma luz que es transmitida a través de esa muestra líquida.
- **Turbidímetro:** Instrumento que mide el nivel de turbiedad en una muestra de agua
- **NTU:** “Unidad nefelométrica de turbiedad” expresa la cantidad de luz que atraviesa la muestra de agua según su nivel de turbiedad.
- **UFC:** “Unidades formadoras de colonias” Expresa el número relativo de microorganismos en un volumen de un metro cúbico de agua.
- **Lux (lx):** Es la unidad derivada del Sistema Internacional de Unidades para la iluminancia o nivel de iluminación

2. RESUMEN

En el presente trabajo se ha llevado a cabo el análisis del proceso de desinfección de agua con radiación solar. Para ello se implementó un prototipo diseñado con el propósito de aprovechar el potencial solar en la zona donde se encuentra ubicada la Universidad Santo Tomás Sede principal. Este estudio incluye el desarrollo de procedimientos en laboratorio que permiten establecer las condiciones óptimas de las variables relevantes en la instalación y avance del prototipo.

Inicialmente por medio de análisis físicos y microbiológicos se realizó la caracterización del agua proveniente de la quebrada la vieja, encontrando bajos niveles de turbiedad, adecuados para realizar el tratamiento; así mismo fueron tomados microorganismos indicadores de contaminación pertenecientes al ecosistema. A partir de esto se procedió a realizar, con el método de diluciones decimales seriadas, una comparación entre la absorbancia y el resultado del recuento microbiano de cada dilución; ya teniendo estos valores se realizó la toma de muestras en laboratorio con los contenedores de cuarzo y se obtuvo una reducción en tiempo del proceso de desinfección.

Se realizó la instalación del prototipo en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás y se realizaron análisis tanto de absorbancia como de intensidad lumínica en varios periodos de tiempo encontrando que en días soleados el proceso es más eficiente, pero que en períodos nublados aunque mejora la eficiencia en comparación con los experimentos analizados en la literatura el proceso de inactivación es más lento.

Se implementaron modelos fenomenológicos y de predicción, del comportamiento del proceso de desinfección, a los resultados obtenidos basados en los tiempos de exposición, supervivencia e intensidad lumínica de la zona medida con un luxómetro.

Palabras claves: intensidad lumínica, absorbancia, desinfección, SODIS

3. INTRODUCCIÓN

Cada vez son más frecuentes los problemas relacionados con la escasez del recurso hídrico, debido a que el libre acceso a dicho recurso impide llevar un control adecuado tanto de contaminación como deterioro por uso excesivo del mismo. Se estima que en Colombia se usan aproximadamente 35987 millones de metros cúbicos de agua anualmente distribuidos en los diferentes sectores productivos presentes en el país y de los cuales el 8,2% de la demanda hídrica nacional corresponde al sector doméstico y aunque no es el sector con el porcentaje más alto su valor es bastante significativo y más teniendo en cuenta que el agua requerida debe ser apta para el consumo humano [1]. Por esto, se vuelve primordial estudiar nuevas formas poco convencionales de potabilizar agua que se implementan en todos los sectores socioeconómicos. Esto quiere decir que se pueden efectuar nuevas formas de potabilizar agua sin necesidad de usar químicos o métodos convencionales lo que permitirá una reducción en costos de tratamiento permitiendo que el agua sea un recurso accesible para todas las personas sin importar su situación económica.

Teniendo en cuenta que las poblaciones que no tienen acceso al servicio de acueducto y alcantarillado buscan asentarse en zonas cercanas a cuerpos hídricos, para abastecer con estos sus viviendas, sin tener presentes los riesgos que pueden llegar a presentarse. Esto se debe a que en general los cuerpos de agua tienen cierta carga contaminante y aunque en algunos es menor que en otros, provocan afectaciones a la salud humana y en casos extremos la muerte. Las personas que viven en las comunidades rurales son las más vulnerables a presentar infecciones hidro-transmisibles por agentes patógenos, de acuerdo a esto podemos establecer que la escasez del recurso, la dificultad de acceder al mismo y la mala calidad van de la mano de la pobreza y de las enfermedades. [2] [3]. De acuerdo con un informe presentado por la Defensoría del Pueblo, basado en registros del IDEAM (Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales) y las Secretarías de Salud, 21 millones de colombianos viven en lugares que tienen dificultades para mantener una disponibilidad apropiada de agua y del 56% de la población rural que cuenta con algún tipo de abastecimiento de agua, solo el 6% cuenta con agua con tratamiento de desinfección, esta es la principal causa de los niveles de morbilidad y mortalidad en poblaciones vulnerables, ya que según estadísticas el 43% de los niños menores de 5 presentaron enfermedad diarreica aguda (EDA) en los últimos cinco años a causa del consumo de agua contaminada [4] [5]. Por esta razón es importante realizar un tratamiento previo de estas aguas y en este tipo de poblaciones se sugieren tratamientos físicos que no requieran de un gasto excesivo de dinero.

Con el desarrollo de esta investigación se buscó dar a conocer un método de potabilización más efectivo y económico que los convencionales para ciertos niveles de calidad de agua, como es el caso del método de desinfección por radiación solar (SODIS) realizando variaciones en el diseño que permitan mejorar su eficiencia integrando conocimientos sobre principios microbiológicos, métodos de tratamiento de aguas y modelos fenomenológicos.

El proyecto inició con la identificación de los parámetros o variables a controlar, como por ejemplo la radiación, temperatura, los materiales del colector, como también la determinación de condiciones fundamentales que debe tener el agua que se va a desinfectar como lo es el caso de la turbiedad (inferior a 30NTU), después de esto, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el proyecto del panel solar fotovoltaico presentado por Aidan Dawyer, se establece el diseño de un prototipo basado en la modelación del fenómeno filotáctico de las plantas a partir de la sucesión de Fibonacci [6], adaptado a las variables identificadas indispensables en el proceso de desinfección. En la tercera parte del proyecto se identificaron los materiales necesarios en la construcción del prototipo para que a partir de esto se proceda a la elaboración del mismo. Posterior a esto se establece un sistema de muestreo y análisis de laboratorio que permita medir las condiciones microbiológicas en las que se encuentra el agua. Por último se realizaron las pruebas pertinentes que permitieron evidenciar la inactivación de microorganismos y que evalúen la eficiencia en tiempos de desinfección de este diseño en comparación los resultados de estudios previos donde se trabaja con esquema convencional.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia en la desinfección de agua utilizando la técnica SODIS a través de un prototipo basado en el comportamiento filotáctico de las plantas adaptado a las condiciones climáticas de Bogotá con agua tomada de un cuerpo hídrico que forma parte de los cerros orientales

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar variables fundamentales para el diseño y puesta en marcha de un prototipo para la desinfección solar del agua (SODIS).
- Implementar un prototipo de desinfección con el método SODIS teniendo en cuenta los principios bio matemáticos de la sucesión de Fibonacci como simulación de la filotáxis.
- Establecer un protocolo de monitoreo que permita medir los cambios en las cantidades de microorganismos patógenos en el tiempo y las demás variables de control (radiación y turbiedad).
- Implementar modelos fenomenológicos a los datos obtenidos de los datos obtenidos en el proceso de desinfección implementado en laboratorio y en campo.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS

Según los resultados obtenidos de pruebas epidemiológicas en estudios previos, se encuentra que los microorganismos patógenos presentes en el agua de la quebrada y que serán mencionados a continuación, son considerados un riesgo para la salud humana no sólo por su consumo sino también por otras vías de exposición como por ejemplo por vía respiratoria.

- **Microorganismos patógenos comunes presentes en agua**

Existen diversos microorganismos patógenos presentes en el agua contaminada utilizada para consumo humano, que puede llegar a afectar a la población, los niveles de riesgo pueden variar dependiendo de distintos factores como la edad del consumidor, la cantidad de agua ingerida entre otros. También es importante tener en cuenta que la transmisión de enfermedades no solo ocurre por consumo directo sino que también se puede ver afectada la persona si tiene algún tipo de contacto o si inhala gotas de tamaño microscópico presentes en el proceso de evaporación, que pueden llegar a contener estos microorganismos.

- **Peligros microbianos relacionados con el consumo de agua:**

Los agentes patógenos presentes en el agua son los principales causantes de enfermedades transmitidas por el agua, generalmente este tipo de microorganismos se difunden de las heces excretadas por personas infectadas o algunos animales causantes de contaminación en los cuerpos hídricos que sirven de abastecimiento para ciertas viviendas. Como se muestra a continuación dependiendo del microorganismo y de su concentración se determina el tipo de enfermedad que puede llegar a adquirir la persona [38].

Tabla 1: Enfermedades relacionadas con bacterias presentes en el agua

Bacterias	Fuente	periodo de incubación	Duración	Síntomas clínicos
<i>Salmonella typhi</i> .	Heces, orina	7-28 días	5-7 días	Fiebre, tos, náusea, dolor de cabeza, vómito y diarrea
<i>Salmonella sp.</i>	Heces	8-48 horas	3-5 días	Diarrea acuosa con sangre
<i>Shigellae sp.</i>	Heces	1-7 días	4-7 días	Diarrea con sangre, fiebres altas, síntomas tóxicos, retortijones, pujos intensos e incluso conclusiones.
<i>Vibrio cholerae</i>	Heces	9-72 horas	3-4 días	Diarrea acuosa, vómito, deshidratación
<i>V. cholerae</i> #1	Heces	1-5 días	3-4 días	Diarrea acuosa

<i>Escherichia coli</i> <i>enterohemoragica</i>	Heces	3-9 días	1-9 días	Diarrea acuosa con sangre y moco, dolor abdominal, agudo, vómitos, no hay fiebre
<i>Escherichia coli</i> <i>enteroanasica</i>	Heces	8-24 horas	1-2 semanas	Diarrea, fiebre, cefalea, mialgias, dolor abdominal, a veces las heces mucosas con sangre
<i>Escherichia coli</i> <i>entero toxígena</i>	Heces	5-48 horas	3-19 días	Dolores abdominales, diarrea acuosa, fiebre con escalofríos, náusea, mialgia.
<i>Yersinia</i> <i>enterocolitica</i>	Heces, orina	1-11 días	1-21 días	Dolor abdominal, diarrea con moco, sangre, fiebre, vomito.
<i>Campylobacte</i> <i>jejuni</i>	Heces	2-5 días	7-10 días	Diarrea, dolores abdominales, fiebre y algunas veces heces fecales con sangre, dolor de cabeza
<i>Plesiomonas</i> <i>shigelloides</i>	Heces	20-24 horas	1-2 días	Fiebre, escalofríos, dolor abdominal, náusea, diarrea o vomito
<i>Aeromonas</i>	Heces	Desconocido	1-7 días	Diarrea, dolor abdominal, náuseas, dolor de cabeza y colitis, las heces son acuosas y no son sanguinolentas.

Fuente: [39]

5.1.1. Características de los microorganismos

La población de microorganismos que habitan en el agua constituye un grupo extraordinariamente variado en donde encontramos bacterias, algas, hongos, protozoos, entre otros.

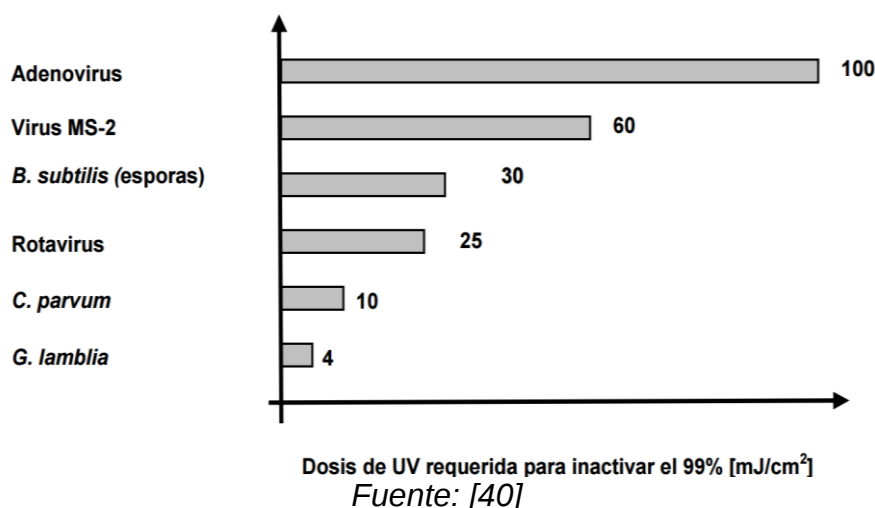
5.1.2. Persistencia de los microorganismos

En cualquier proceso de desinfección de agua es importante tener en cuenta la resistencia de los microorganismos al proceso de desinfección que se vaya a utilizar, ya sean bacterias, virus o protozoos. Un ejemplo son los virus los cuales tienen un alto nivel de resistencia a la radiación UV, pero un bajo nivel de resistencia en los procesos de desinfección con cloro. Por esta razón y para este caso en particular es necesario identificar aquellos microorganismos patógenos que puedan llegar a presentar mayor resistencia a la desinfección solar y afecten el proceso en la fase experimental [40].

Microorganismos como *Cryptosporidium parvum* presentan una marcada persistencia a los sistemas químicos de desinfección pero presentan altos niveles de susceptibilidad a la radiación UV por este motivo para inactivar este tipo de patógenos se requieren pocas dosis de exposición a la radiación UV [41].

Como se muestra en la siguiente gráfica las concentraciones necesarias para inactivar bacterias esporuladas es mayor con respecto a los protozoarios. Esto se debe en gran medida a que estas bacterias utilizan las endosporas como formas de perdurar frente a los efectos del calor, la desecación, la radiación y las influencias de procesos de desinfección que incorporan algún químico [41].

Gráfica 4: Comparación de la eficiencia de la radiación UV en el proceso de inactivación de patógenos con longitud de onda de 260nm



5.2. DESINFECCIÓN DEL AGUA

Hace referencia principalmente a la inactivación de microorganismos especialmente los patógenos ya que estos son los causantes de enfermedades, un ejemplo es el *Escherichia coli* en muchos casos causante de diarrea y en ciertos casos de disentería. Por esta razón se considera que la desinfección es un proceso clave en cualquier sistema de tratamiento de agua [7]. Actualmente existen métodos tanto físicos como químicos de desinfección de agua como:

- **Ultrafiltración:** El proceso de este método es similar a la micro filtración, nano filtración y osmosis inversa, la diferencia que existe entre estos procesos se debe principalmente al tamaño de los poros de la membrana filtrante este método busca retener sólidos suspendidos en función de su tamaño físico por medio de un lecho filtrante y la variación de presiones en el sistema.
- **Cloro:** Este es el método de desinfección más común por su bajo costo, en dicho método se aprovecha la capacidad oxidante del compuesto como mecanismo de destrucción de la integridad del microorganismo y su efecto residual.

Los principales beneficios de usar este compuesto en la desinfección de agua son:

- a) El cloro tiene acción germicida en un espectro amplio.

- b) El cloro y sus derivados presentan propiedades residuales que les permiten tener una buena persistencia en los sistemas de distribución de agua.
- c) A nivel de costos este es un compuesto económico y de fácil acceso [8].
- Permanganato de potasio: En esta desinfección se utiliza el permanganato de potasio como agente oxidante, lo que le permite eliminar hierro y magnesio fundamentalmente.
- Ozono: Actúa sobre las bacterias por oxidación, interviniendo en la formación de ATP, de modo tal que las bacterias presenten una deficiencia en su proceso de respiración. [8]
- Radiación solar: Este método consiste principalmente en elevar la temperatura del agua en contenedores hechos con materiales conductores de calor adaptados para absorber la temperatura proveniente de la radiación solar con el fin de aniquilar microorganismos patógenos presentes en el agua. [8]
- Radiación ultravioleta: En este método se utilizan generalmente lámparas que emiten radiación con una longitud de onda de 254nm, ya que esta medida es considerada como la longitud de onda de radiación germicida.

La capacidad que tiene la luz solar de eliminar organismos patógenos presentes en el agua se debe a que cuando el proceso térmico excede los 45°C reaccionan los agentes foto sensibilizadores que actúan al ser irradiados por la luz y el oxígeno presente en el agua, produciendo moléculas reactivas (peróxido de hidrogeno H_2O_2 y el ión de superóxido O_2^-) [9] [10]

La idea de la desinfección solar del agua fue presentada por primera vez por Aftim Acra en un folleto publicado por UNICEF en 1984. Un equipo de investigación de EAWAG/SANDEC inició exhaustivos experimentos de laboratorio durante 1991, con el fin de evaluar el potencial de este método para inactivar bacterias y virus, en donde se encontró una inactivación de microorganismos al exponer el agua a una combinación de radiación y aumento en la temperatura, de acuerdo a esto, se plantea un proceso térmico en el que por medio de contenedores adaptados para absorber la mayor cantidad posible de calor proveniente de la radiación solar, eleva la temperatura del agua contenida en estos recipientes. Al realizar varias pruebas en campo se verificó la eficiencia de este método de desinfección lo que permitió que en 1999 se lanzaran iniciativas y actividades de aplicación de SODIS en varios países de América Latina, así como en Indonesia, Sri Lanka, India, Nepal, Pakistán, Uzbekistán, Kenya, Sudáfrica, Angola etc. [11] [12].

A partir de la implementación de esta técnica se han ido desarrollando una serie de diseños y tecnologías que permiten mejorar la eficiencia y se han identificado una serie de factores que se deben tener en cuenta:

- El tiempo mínimo de irradiación bajo el cielo claro requerido para eliminar la carga contaminante presente en el agua a desinfectar.
- Tipos y materiales de envase del agua para la desinfección
- La influencia del envejecimiento del envase en caso de ser PET por uso prolongado
- La posible presencia de fotoproductos precursores, si se utilizan botellas PET recicladas
- El área geográfica.
- El efecto de las estaciones y el clima (la intensidad de radiación solar varía con la hora del día, ubicación geográfica y clima),
- La influencia de la calidad del agua recolectada.
- La presencia de bacterias en el agua recolectada

A continuación se presentan una serie de estudios y pruebas realizadas que muestran el desarrollo que se ha presentado en esta técnica a partir de modificaciones de diseño, la mayoría tienen en cuenta los parámetros de calidad de agua para consumo humano establecida en la zona donde se instalan los reactores, de acuerdo a estos los experimentos realizados se enfocan en la inactivación de *E. coli*, *C. parvum* y *C. hominis*.

Hipólito Gomez-Couso [13] realizó pruebas de laboratorio en donde se simulaban radiaciones de (200, 600, 900 W/m², para determinar a qué nivel de radiación es más efectiva la desinfección de aguas con turbiedad de 5,100 y 500 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbiedad). Un factor importante es que se procuró una temperatura ambiente de 30°C, después de 8 horas de exposición se realizó un ensayo de Jarras para extraer los sedimentos y realizar pruebas para comprobar la inactivación de los agentes patógenos y a partir de estos análisis se encontró que el método de desinfección es efectivo, pero aguas más turbias necesitan un aumento en el tiempo de exposición [13].

Al realizar las pruebas en campo se encontró que al ubicar los contenedores (botellas PET) en los tejados de las viviendas, comúnmente en techos de asbesto, no se inactivan los coliformes presentes en el agua, por lo tanto se planteó un diseño en el que por medio de cartón recubierto con papel aluminio se dirige y concentra la energía hacia los contenedores como se muestra en la imagen1 [14].

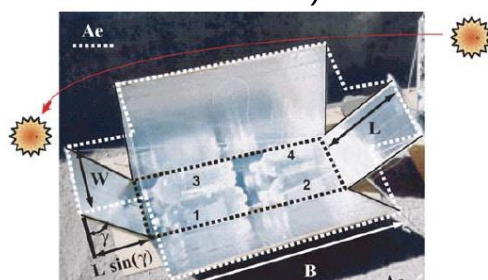
Imagen1: Concentrador solar y botellas PET



Fuente: [14]

Después de este primer diseño se evidenció que aumenta la eficiencia al implementar concentradores de energía hechos de láminas de aluminio en forma rectangular, debido a que estas reflejan el 82% de la radiación UV y 85% de otros tipos de radiación, como se muestra en la imagen 2, pero al realizar los estudios de desinfección se encontró que después de 4 horas de exposición las solapas comienzan a hacer sombra en el contenedor, disminuyendo la eficiencia en la desinfección y aumentando las horas de exposición, esto se debe a la posición del sol [15], [16], [17].

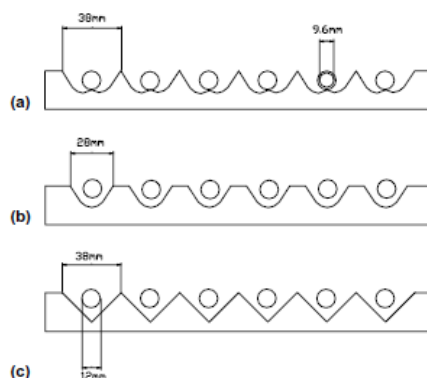
Imagen2: Concentrador rectangular con cuatro reflectores (láminas de aluminio)



Fuente: [15]

Con el fin de evitar la presencia de sombra en los contenedores se plantearon tres reflectores CPC (láminas de aluminio de 0,5mm de grosor) el primero parabólico compuesto, el segundo parabólico y en forma de V como se muestra en la imagen 3, se ubican con una orientación este-oeste teniendo en cuenta el posicionamiento del sol a lo largo del día. Por otro lado se le aplica TiO_2 al agua como agente fotocatalizador pero al realizar los estudios respectivos se encontró que la inactivación de microorganismos patógenos se puede lograr solo con la radiación obtenida en exposición directa sin necesidad de usar un fotocatalizador [16], [18].

Imagen3: Reflectores, a) parabólico compuesto, b) parabólico y c) forma de V.



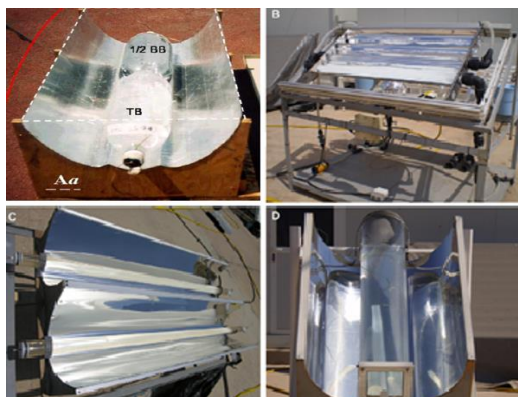
Fuente: [18]

Al realizar las pruebas en campo se encontró que el reflector más adecuado es el parabólico compuesto o de doble parábola, ya que permite una mejora en el efecto fotocatalítico que ocurre en los contenedores al exponerlos a la radiación solar permitiendo que la radiación solar incidente se enfoque directamente a los

contenedores, ya que en comparación con los otros contenedores este anula la presencia de sombra en el reactor [18].

A partir de esto se buscó mejorar la eficiencia por medio de modificaciones en el material de los contenedores. Se realizó un experimento que compara la eficiencia de desinfección por medio del uso de botellas PET, recipientes de vidrio de borosilicato de 5 cm de diámetro y recipientes de metacrilato de 20cm de diámetro, utilizando en los tres recipientes concentradores de energía de doble parábola como se muestra en la imagen 4 y los resultados obtenidos arrojan que en los recipientes de vidrio de borosilicato transmiten hasta un 90% de la radiación UV-A y hasta 45% de radiación UV-B, sin embargo, en el sistema hecho de metacrilato se absorbió en el intervalo de radiación UV-B y UV-A, de una manera similar a lo que se observó en los sistemas hechos de botellas PET (Tereftalato de polietileno) [19].

Imagen 4: Diferentes reactores de desinfección solar a) botellas de tereftalato de polietileno (PET) b y c) Tubos de vidrio de borosilicato y d) tubos de metacrilato.

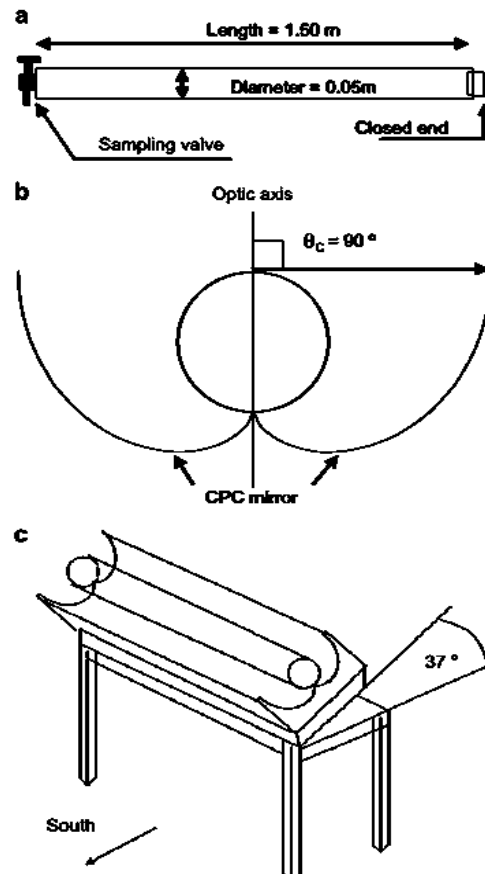


Fuente: [19] [15]

En el sistema que contiene el reactor hecho de polimetacrilato de metilo se encontró que el volumen del recipiente afecta la eficiencia del método SODIS, en cuanto a la radiación que ingresa y a los cambios en la temperatura del reactor, ya que estos dependen fundamentalmente del volumen de la columna de agua y en el sistema que utiliza botellas PET se encontró que al exponer estos recipientes a la radiación solar se liberan una serie de agentes químicos que pueden llegar a afectar la salud humana, no de manera crítica, ya que la migración de estos agentes es muy mínima, pero si pueden llegar a liberar dioxinas cancerígenas en el agua [19], [20].

Por último teniendo en cuenta la segunda ley de la termodinámica, la cual impone restricciones a la dirección de la transferencia de calor, se establecen los siguientes estándares en las dimensiones de los sistemas de desinfección. Cada tubo debe tener dimensiones de longitud de 1,50 m, 0,05 m de diámetro exterior, un espesor de pared 1,8 mm y 2,5 L de volumen interno, como se muestra en la imagen 5. Por otro lado se plantea que las láminas de aluminio tengan una inclinación de 37° de acuerdo a la orientación del sol [21].

Imagen 5: Dimensiones del sistema de desinfección por método SODIS



Fuente: [21]

5.3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA QUEBRADA LA VIEJA

De acuerdo con la documentación de la quebrada la vieja se establece que sus condiciones físicas corresponden a la de un río de montaña con una altura máxima de 3200 msnm y una altura mínima de 2690 msnm, con una temperatura del agua relativamente constante con un valor promedio de 14°C y con un caudal medio de $15,6 \text{ l.s}^{-1}$ [22].

5.4. PROTOTIPOS SOLARES PRELIMINARES

A partir de los estudios realizados por Aidan Dawyer [23] con respecto a la captura de radiación solar, se evidencia que al realizar la comparación de un colector solar convencional con respecto a uno diseñado en base al modelo de simulación matemática de Fibonacci aplicada de los patrones de distribución de las plantas, a diferentes condiciones de luz solar, se obtiene que el prototipo genera 20% más de energía en periodos soleados y 50% más de energía en periodos de sombra en comparación con un panel fotovoltaico convencional con las mismas celdas que el prototipo [23].

5.4.1. Árbol solar

Esta idea se ha ido desarrollando a lo largo del mundo debido a la eficiencia que tiene y su diseño que es agradable a la vista, inicialmente la idea fue desarrollada con el fin de aprovechar los principios filotácticos de las plantas y aplicarlos matemáticamente a la sucesión de Fibonacci en la captación de energía solar como se puede ver en la siguiente imagen [23].

Imagen 6: Los dos modelos de colector solar



Fuente: [23]

5.4.2. Árbol eólico

Este modelo se desarrolló en Francia por el emprendedor Jérôme Michaud-Larivière y el diseñador Claudio Colucci, un sistema de producción de electricidad en forma de árbol, como se ve en la imagen el principal propósito es que las hojas operen como mini-turbinas eólicas que por su material liviano y resistente permiten generar energía con una pequeña brisa de 2 metros por segundo. [24]

Imagen 7: “Wind tree” aerogenerador en forma de árbol



Fuente: [24]

En la universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, se realizó el diseño y simulación de un generador eólico de eje vertical de baja potencia que busca aprovechar la velocidad del viento de la zona para generar energía de forma renovable, en este proyecto de investigación se establecen y analizan todos los

parámetros de diseño como la velocidad del viento, los materiales de construcción, las dimensiones entre otros [25].

5.5. FILOTÁXIS

El estudio de la filotaxis está dividido en tres períodos históricos. El primero es el período antiguo en donde filósofos y científicos como Teofrasto y Plinio hablan de que las hojas están dispuestas en series regulares alrededor de las ramas, identificando un patrón que sirve como ayuda en el reconocimiento de las plantas, a partir de estas investigaciones se generan enfoques multidisciplinarios en consideración con los patrones de la filotaxis, lo cual da origen al período contemporáneo, en este se dan las contribuciones más significativas en la historia de la investigación de la filotaxis como por ejemplo el nacimiento del término biomatemática que hace referencia al modelamiento de fenómenos biológicos [26]. Por último se encuentra la edad moderna en este período el estudio de los patrones filotáticos se ha concentrado en países como Alemania, Francia y el Reino Unido en donde se han realizado experimentos que permiten explicar los modelos geométricos y matemáticos de los fenómenos de la filotaxis en las plantas [27].

Actualmente se distinguen los patrones filotáticos en dos grandes grupos, las plantas con distribución alterna que son las que en cada rama brota una hoja y las plantas con distribución verticilada que hace referencia al brote de dos o más hojas en un nudo. Así mismo encontramos clasificaciones dentro de estos dos grandes grupos. Existe filotaxis alterna dística y helicoidal (dispersa), la primera hace referencia a que el crecimiento de las hojas es opuesto en el tallo y la segunda hace referencia a que cada hoja presenta un ángulo de giro inferior a 180° con respecto a la hoja anterior, con respecto a la filotaxis verticalada se encuentran las descusadas las cuales hacen referencia a aquellas plantas en las que de un nudo brotan exactamente dos hojas. Es importante tener en cuenta que aunque se presenten estas clasificaciones la filotaxis de una planta no es siempre constante en ocasiones puede llegar a variar [28], [29].

Al observar la hoja más baja en el tallo y rotar alrededor del tallo hasta encontrar la hoja que esta superpuesta a esta hoja inicial se obtiene un ángulo de rotación, a esto se le da el nombre de ángulo de divergencia, este es importante ya que permite que la planta obtenga la mayor cantidad de luz solar y nutrientes y se calcula dividiendo el número de rotaciones del tallo entre el número de hojas que han pasado [27].

5.5.1. Filotaxis alterna dística

En esta las hojas están dispuestas a lo largo del tallo en puntos opuestos alternándose una sobre otra en cada nudo como se ve en la imagen 8[30].

Imagen 8: Filotaxis dística



Fuente: [30]

5.5.2. Filotaxis alterna helicoidal

En estas las hojas están dispuestas sobre líneas verticales llamadas espirósticos las cuales hacen referencia que la trayectoria que llevan no es propiamente vertical en esta se procura que el ángulo de divergencia que existe entre hojas sea inferior a 180° [30]

Imagen9: Filotaxis helicoidal

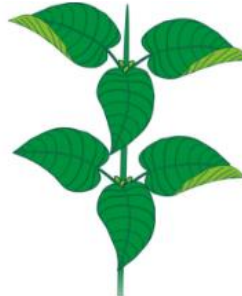


Fuente: [30]

5.5.3. Filotaxis verticalada

En esta existen 3 o más hojas dispuestas en un mismo nudo [30]

Imagen 10: Filotaxis verticalada

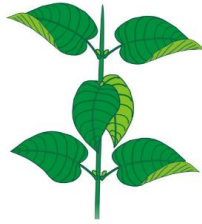


Fuente: [30]

5.5.4. Filotaxis descusada

En esta se encuentran dos hojas en el mismo nudo, en donde los pares de hojas están dispuestos en cruz con respecto al siguiente. [30]

Imagen 11: Filotaxis descusada



Fuente: [30]

5.6. SUCESIÓN DE FIBONACCI

En la simulación de fenómenos biológicos como la filotaxis se utilizan modelos matemáticos como la sucesión de Fibonacci, la cual consta de una serie de números naturales que se suman de tal forma que cada término se obtiene de la suma de los dos anteriores así: 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987, 1597, 2584. Esta sucesión infinita se representa con la ecuación (1) [31].

$$X_N = (X_n - 1) + (X_n - 2) \quad (1)$$

Karl Schimper y Alexander Braun establecen que los ángulos de divergencia de la filotaxis helicoidal son fracciones racionales que se pueden escribir como fracciones de elementos alternos de la sucesión de Fibonacci [28]. Esta sucesión ha sido ampliamente estudiada por su relación con el número áureo ya que se ha encontrado a partir de investigaciones que el cociente de términos consecutivos de Fibonacci tienden a Φ (número de oro o áureo), este número es relacionado principalmente con la proporción ideal, de acuerdo a esto se establece la serie de Schimper-Braun que tenderá más o menos al ángulo de divergencia ideal y está basado en la ecuación (2) [32].

$$\frac{1}{\Phi^2} \quad (2)$$

6. MARCO METODOLÓGICO

Para la elaboración del prototipo se establecen una serie de pasos a seguir los cuales inician con la identificación de parámetros fundamentales a tener en cuenta tanto para el diseño como para la puesta en marcha del prototipo, a partir de esto se establecen los principios biológicos y matemáticos necesarios en el dimensionamiento del diseño para proceder a la construcción del prototipo y por último realizar los experimentos y análisis pertinentes para determinar la eficiencia del prototipo en la desinfección de agua por radiación solar usando la técnica SODIS. Para esto es necesario realizar las siguientes actividades:

- Recolección de información a partir experimentos previos de desinfección por medio del método SODIS con el fin de establecer los parámetros necesarios para implementar el prototipo.
- Establecer el diseño del prototipo teniendo en cuenta el patrón de distribución de las hojas en el tallo utilizando la filotaxis y la sucesión de Fibonacci
- Construir el prototipo teniendo en cuenta los materiales y la distribución planteada en el diseño
- Realizar pruebas y experimentos que muestren que realmente se presenta una inactivación de microorganismos patógenos en las muestras de agua.

6.1 FASES – PASO A PASO

- **Fase 1:** Identificación de variables dependientes a partir de experimentos previos

Se realizó un análisis de las variables que intervienen en el proceso de desinfección. Como primera se medida se identificaron y analizaron los datos históricos de temperatura, horas de brillo solar, trayectoria del sol y radiación solar en la ciudad de Bogotá, como también se tomaron medidas de intensidad lumínica en la zona donde fue ubicado el prototipo con el fin de determinar el comportamiento solar de la zona en los meses en los que se realizaron las pruebas. Por otro lado se realizó una comparación de la absorbancia de varios materiales para identificar cual es el más adecuado para contener el agua a la que se le realizó el tratamiento. Por último se toman medidas de turbiedad de agua de consumo, de un acuario ubicado en el laboratorio de microbiología de la universidad Santo tomas y de agua proveniente de una quebrada que forma parte de los cerros orientales, con el fin de comparar estos valores con los de la literatura para determinar si el agua utilizada durante el proceso es apta para el tratamiento por método SODIS.

- **Fase 2:** Experimentación

Se realizaron pruebas en laboratorio con el fin de establecer un protocolo de muestreo adecuado para obtener resultados efectivos durante la toma de datos del experimento realizado en campo. Se analizaron los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio, con el fin de sacar conclusiones del proceso de desinfección al implementar los tubos de cuarzo y las láminas reflectoras, también se realizaron observaciones del comportamiento de los microorganismos agregados al agua, 24 horas (en sombra) después de haber sido expuestas a la radiación de la lámpara UV ubicada en el laboratorio de microbiología de la universidad santo tomas y a raíz de este comportamiento se analizaron los tapones de los contenedores de agua y se implementaron las modificaciones pertinentes para que el tapón no generara sombra en el contenedor y que permitió adicionar un septo que facilito el muestreo por jeringas.

- **Fase 3:** Diseño del prototipo

Para el diseño del prototipo se tuvieron en cuenta modelos de simulación del patrón de comportamiento fotosintético de las plantas con el fin de aumentar la eficiencia en la inactivación de microorganismos patógenos en las muestras de agua. Primero se tuvo en cuenta que se le llama filotáxis a la organización de las hojas en el tallo de acuerdo a esto se clasifican dos tipos de plantas la distribución alterna que es la que en una rama solo crece una hoja y la distribución verticilada que es en la que de un solo nudo brotan dos o más hojas y a esta se establecen unos subgrupos en los cuales se encuentra la filotáxis helicoidal que establece que una hoja nunca se sobrepone a otra y para esto es fundamental establecer o determinar el ángulo de divergencia el cual debe ser inferior a 180° según lo encontrado en la literatura citada.

El modelo matemático a tener en cuenta es la sucesión de Fibonacci en la que se plantea que cada término de la sucesión corresponde a la suma de los dos anteriores esto es importante ya que permite entender matemáticamente las proporciones de los patrones filotácticos de varias especies de árboles enfocado en el ángulo de divergencia. Como resultado de esta fase se elabora un plano electrónico que permita evidenciar un diseño eficiente que se ajuste a los parámetros que se necesitan a la hora de implementar el prototipo.

- **Fase 4:** Construcción y pruebas del prototipo

De acuerdo a lo encontrado de experimentos previos se estableció que el material más efectivo en la desinfección es el borosilicato, pero como la idea de esta técnica de desinfección es aumentar el paso de radiación se buscó un vidrio de características similares pero que tengan un mínimo de absorbancia en el intervalo de radiación germicida dando como resultado contenedores de cuarzo. Luego de esto se buscan láminas de aluminio que se puedan reciclar y moldear de tal forma que se obtenga una mayor eficiencia (doble parábola). Teniendo armados los reactores se procedió a armar el tallo y las ramificaciones para esto se deben tener en cuenta el peso de cada reactor para establecer el material más adecuado, ya que este debe ser resistente para soportar el peso de los reactores.

Con el prototipo previamente instalado y con las muestras de agua de la quebrada con adición de *E.coli* se realizaron mediciones cada hora y por minutos, con el fin de tener condiciones ambientales lo más constante posible, que permitieron evidenciar la inactivación de microorganismos en el agua dependiendo del tiempo de exposición, con esto se busca dar respuesta a la hipótesis planteada de que se puede lograr una reducción en el tiempo de exposición al implementar el diseño establecido. Teniendo estos resultados se aplican modelos matemáticos fenomenológicos que permitan describir gráficamente el comportamiento de los microorganismos a los efectos combinados de la radiación solar y la temperatura ambiente.

6.2 MÉTODO

- Tipo de investigación

La investigación es aplicada, ya que se aplican conocimientos ya existentes en la solución de problemas prácticos.

- Tipo de diseño

El diseño es experimental puesto que se busca manipular o aprovechar intencionalmente la variable independiente (tiempo de exposición) con el propósito de medir los efectos que esta tiene sobre la variable dependiente (microorganismos presentes en el agua) con respecto a la intensidad de la radiación solar.

- Tipo de información

La información que se obtiene a partir del modelo y el ensayo es cuantitativa, puesto que se adquieren valores de unidades formadoras de colonias sin exposición y con exposición a la radiación a través del tiempo.

7. DESARROLLO CENTRAL

7.1. FASE 1: Identificación de variables dependientes e independientes a partir de experimentos previos.

7.1.1. Potencial solar disponible

Inicialmente se determinó el potencial solar presente en la Universidad Santo Tomás cede centro de la ciudad de Bogotá, lugar de instalación del prototipo.

Sistema de determinación del potencial solar

Para diseñar el prototipo de forma que absorba toda la radiación solar que se necesita y que mejore la eficiencia en el proceso de desinfección, en primera medida, se debe determinar la potencia de radiación solar de la zona o el sector en el que se instaló (Universidad Santo Tomás), para esto se planteó un método general a tener en cuenta si se desean instalar máquinas de este tipo para la desinfección con SODIS.

Par poder determinar el potencial solar de una zona determinada es necesario:

- a) Realizar mediciones de intensidad lumínica, radiación solar y trayectoria del sol in situ
- b) Determinando el potencial solar según los datos que brindan las estaciones meteorológicas presentes en esta zona
- c) Tomar en consideración las investigaciones previas, datos de sitios web especializados en variables solares aplicadas a la zona de instalación.

El primer punto de este método está basado en mediciones tomadas en la zona durante un corto período de tiempo, esencialmente en el que se realizó el experimento. El segundo, identificar variables ambientales de la zona a partir de un análisis realizado a los datos obtenidos de varios periodos de tiempo de una o varias estaciones meteorológicas cercanas a la zona de instalación y en el tercer punto se aprovecharon las mediciones analizadas en proyectos previos y sitios web especializados que den una idea del comportamiento de la radiación solar en este punto.

Para el cálculo del potencial solar de la zona se tuvo en cuenta los siguientes parámetros:

- a) Número de horas de brillo solar anual
- b) Número de horas de brillo solar mensual
- c) Intensidad lumínica (lx)
- d) Posición del sol

En la instalación del prototipo el factor principal que se tendrá en cuenta es la trayectoria del sol ya que según la información que se obtenga de este se determinara la dirección que tendrá cada hoja del árbol.

7.1.2. Descripción del comportamiento solar en el lugar de instalación

Inicialmente se tomaron valores de intensidad lumínica con un fotómetro que mide la intensidad en luxómetros, imagen del instrumento en el anexo A, se tomaron muestras durante un período de 12 horas iniciando las mediciones a las 6 de la mañana y finalizando a las 6 de la tarde durante una semana. A partir de esto se obtienen los siguientes datos y se evidencia el comportamiento en periodos soleados y nublados.

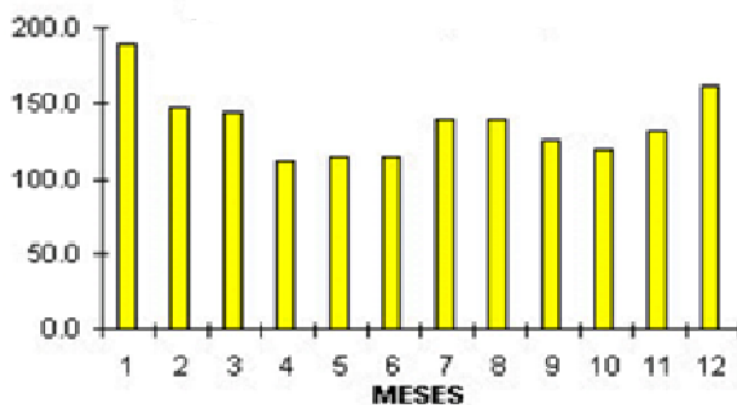
Tabla 2: Intensidad lumínica en la universidad Santo Tomás sede central 2016.

INTENSIDAD LUMINICA lx								
	Jueves 24 nov	Viernes 25 nov	Lunes 28 nov	Martes 29 nov	Miércoles 30 nov	Jueves 1 dic	Viernes 2 dic	Lunes 5 dic
6:00	9680	312	218	109	1240	2050	3400	540
7:00	6560	14260	402	5580	30500	5300	7580	35900
8:00	24200	18600	13000	11180	2750	6400	10820	107000
9:00	45500	41600	15200	27900	9520	10360	16220	18030
10:00	59000	16800	46400	3490	15620	9310	24600	16030
11:00	143000	19240	41400	110000	2410	56200	13750	170300
12:00	123300	27300	10400	67400	5810	14330	38300	21400
1:00	14500	5420	15550	80000	2900	20700	130000	26200
2:00	14280	45800	7060	12910	5080	71300	6500	68700
3:00	11250	76700	5150	3360	7900	46000	60300	4200
4:00	6680	13700	4810	22400	4400	2320	41300	5290
5:00	5120	3750	3210	4180	3910	1419	3280	3860
6:00	5	74	32	20	17	13	29	19

Fuente: Autor

Después de esto realizo un análisis de la información dada por las estaciones meteorológicas del IDEAM de la zona en donde se observa que el número de horas de brillo y la radiación solar presentan los siguientes comportamientos:

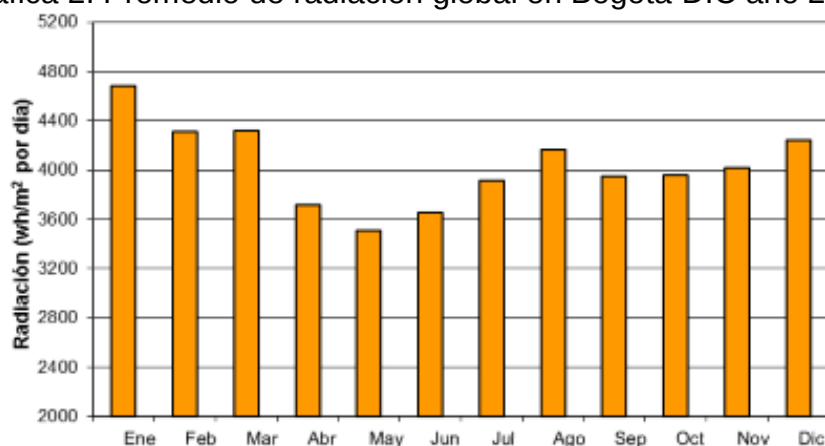
Gráfica 1: Número de horas de brillo solar anual en Bogotá D.C.



Fuente: [33]

En esta gráfica se observa un comportamiento relativamente bimodal en donde en el período de diciembre a enero se encuentran los valores máximos en número de horas, así como en junio y agosto que se observa un aumento en el número de horas con presencia de brillo solar, en cuanto a los meses de octubre, noviembre y diciembre en los que se realizaron las mediciones in situ se presentan 130 horas de brillo solar para el mes de noviembre y 150 para el mes de diciembre.

Gráfica 2: Promedio de radiación global en Bogotá D.C año 2015

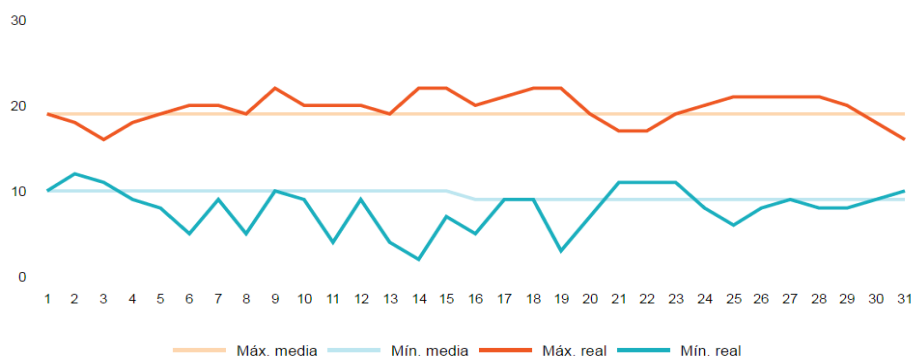


Fuente: [34]

En los datos de distribución mensual de radiación solar en la ciudad de Bogotá (zona de instalación el prototipo) se observa que en los meses de octubre y noviembre los promedios mensuales de radiación oscilan en 4000 (Watt-hora/m²/día) y en el mes de diciembre son superados estos niveles.

Por otro lado se deben tener en cuenta los valores de temperatura de la zona, como se muestra a continuación en la gráfica 3 en donde se observa que las temperaturas máximas en el mes de diciembre tienen un valor promedio de 22°, este valor nos indica un aumento en la temperatura de este mes en comparación con la media histórica la cual tiene un valor promedio de 19°C y por último se encuentra que el comportamiento de las temperaturas mínimas en este mes es muy variado y se presentan temperaturas mínimas diarias de hasta 5°C. [35]

Gráfica 3: Promedio mensual de temperaturas en Bogotá diciembre 2016



Fuente: [33]

Esta información climatológica es relevante a lo largo del desarrollo del proyecto ya que son variables del comportamiento ambientales que influyen directamente en el proceso de desinfección solar.

Por otro lado se encontró que la trayectoria del sol en la zona de estudio, según los datos presentados por SUNEARTH [36], como se puede constatar en el anexo B, presenta los siguientes resultados:

Tabla 3: Trayectoria diaria del sol universidad Santo Tomás.

Horas	Desplazamiento angular (grados)	Dirección
07:00am	0°	Este
08:00am	15°	Este
09:00am	30°	Este
10:00am	45°	Este
11:00am	60°	Este
12:00am	75°	Este
01:00pm	90°	Cenit
02:00pm	75°	Oeste
03:00pm	60°	Oeste
04:00pm	45°	Oeste
05:00pm	30°	Oeste
06:00pm	15°	Oeste
07:00pm	0°	Oeste

Fuente: Autor

Esta información es fundamental para definir los parámetros de diseño y la ubicación del prototipo de desinfección solar, para que partir de esto pueda adquirir toda la radiación solar posible.

7.1.3. Selección de material (contenedor de agua)

El parámetro principal para la eficiencia del prototipo de desinfección solar de agua es que el contenedor de agua deje pasar la mayor cantidad de radiación a la muestra. Por lo tanto se debe elegir un material que tenga un mínimo de absorbancia a la longitud de onda entre 225 y 302nm (rango germicida).

Se realizó un análisis de materiales en función de la longitud de onda por medio de un espectrofotómetro UV-Vis en donde se compara el valor de absorbancia de una celda en blanco y una celda que contiene un trozo del material, es importante aclarar que se trabajó en la región ultravioleta por esto las celdas son de cuarzo, en el ANEXO C se evidencian los resultados de este muestreo los cuales nos permitieron realizar la siguiente matriz comparativa en donde se evaluaron los resultados de absorbancia en el rango de 225 a 302 nm ya que es el considerado según estudios previos como el rango ultravioleta letal (germicida) y si se mantienen intensidades dentro de este rango se obtendrá la máxima eficiencia en el proceso de desinfección [37].

Tabla 4: Comparación de los valores de absorbancia de cada material en el rango de longitud de onda de 200-290nm.

Absorbancia			
Material	Espesor (mm)	Absorbancia para la longitud de onda(A_{λ}) de:	
		200nm	295nm
Acrílico (pequeño)	2	3	2,832
Acrílico (mediano)	3	3	> +3
Acrílico (Grueso)	5	2,9	1,080
Cuarzo	5	0,34	0,154
Lente sin aumento	6	2,9	> +3
PET		> + 3	> + 3
PVC	1	> + 3	> + 3
Vidrio (Grueso)	5	2,95,7	> + 3
Vidrio (Delgado)	2	2,9	> + 3
Vidrio boro silicato	2	3	2,9

Fuente: Autor

7.1.4 Turbiedad del agua

Se realiza un análisis de turbiedad al iniciar el proceso de desinfección para establecer si los parámetros iniciales son los adecuados según lo establecido en la literatura, la cual indica que en aguas turbias la eficiencia del proceso de desinfección es menor debido a que la presencia de partículas reduce considerablemente la penetración de radiación UV en el agua en este proceso se utiliza un turbidímetro que debe ser calibrado previo a la toma de datos. Para calibrar el turbidímetro se tienen 6 soluciones cada una con una turbiedad estándar se miden de la menos turbia a la más turbia. Una vez calibrado el turbidímetro se obtienen los valores de la tabla 5 en donde se comparan la turbiedad del agua utilizada a lo largo del experimento (quebrada la vieja), agua de un acuario del laboratorio de microbiología de la Universidad Santo Tomás, agua de consumo y la turbiedad que establece la literatura. [38]

Tabla 5: Comparación de los resultados de los valores de turbiedad arrojados por el turbidímetro.

	TURBIEDAD (NTU)
LITERATURA	30
AGUA DE CONSUMO	1,1
AGUA DE ACUARIO	12,4
AGUA DE LA QUEBRADA	19,3

Fuente: Autor

Según los resultados obtenidos (Tabla 5) de las muestras de agua de la quebrada La Vieja y los valores máximos de turbiedad que exige la literatura 30 (NTU), se determina que la muestra de agua de la quebrada es apta para

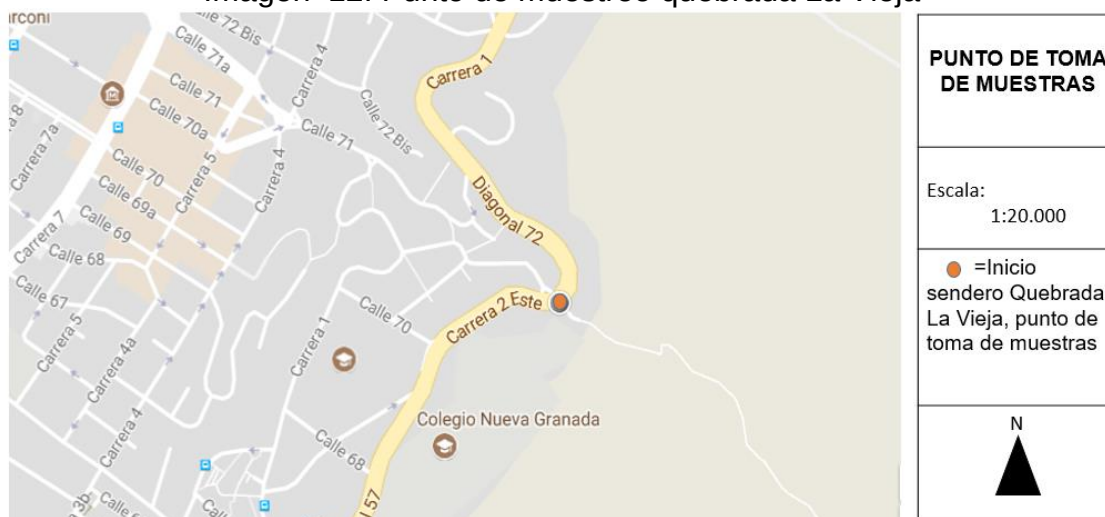
realizar el proceso de desinfección solar, basado en que el valor de turbiedad es inferior al valor establecido, teniendo en cuenta una muestra de agua con un valor de turbiedad mayor al máximo establecido conlleva la presencia de sólidos de gran tamaño, lo que hace que la muestra de agua deba tener un pretratamiento antes de aplicar el método SODIS.

7.5. FASE 2: Experimentación

7.2.1. Puntos de muestreo

Las muestras se tomaron en la quebrada La Vieja que nace en la parte alta del cerro aproximadamente a 3250 msnm, drenando la franja de los cerros orientales hasta llegar a la altura de la calle 71 con carrera 4. El punto de muestreo está ubicado aguas abajo de la quebrada en la entrada al sendero peatonal que recorre toda la quebrada más específicamente en la Cl. 71 #1-45, Bogotá D.C.

Imagen 12: Punto de muestreo quebrada La Vieja



Fuente: Google earth

7.2.2. Equipos

- **Espectrofotómetro:** Este equipo es uno de los instrumentos para utilizados en la física óptica, el cual sirve para medir la longitud de onda así como la relación entre valores de una misma magnitud fotométrica. El espectrofotómetro es regularmente utilizado para la cuantificación de microorganismos y sustancias en los laboratorios de química. En el análisis de muestras se utilizaron dos tipos de espectrofotómetro, uno especializado en el análisis de absorbancia de materiales y otro para el análisis de absorbancia de líquidos.

Espectrofotómetro (líquidos): LaMotte Smartspectro spectrophotometer 2000-1:

Portátil para uso en campo y en laboratorio, fácil de usar y de gran precisión. Selección automática de longitud de onda y programado con 80 diferentes

parámetros para el análisis de calidad del agua. Capacidad para introducir hasta 25 pruebas adicionales definidas por el usuario. Capacidad para establecer secuencias de análisis frecuentes.

Imagen 13: LaMotte Smart spectro spectrophotometer 2000-1



Fuente: [39]

Especificaciones:

precisión	+/- 2nm
Resolución	1nm
Ancho de banda	5nm (máx.)
Rango fotómetro	0-125%T -0.1 A2.5A
Precisión fotométrica	+/- 0.005A
Fuente de iluminación	Lámpara de cuarzo halógeno
Vida del bulbo	1000 horas mínimo
Adaptador universal para	Celdas cilíndricas de 25mm, viales cuadrados de 10mm
Detector	UDV y viales COD
	Fotodo de silicón

- **Fotómetro-Luxómetro:** Es un instrumento de medición que permite medir simple y rápidamente la iluminancia real y no subjetiva de un ambiente, contiene una célula fotoeléctrica que capta la luz y la convierte en impulsos eléctricos, los cuales son interpretados y representada en un display o aguja con la correspondiente escala de lux. Este fue utilizado para medir la intensidad lumínica de la zona donde está ubicado el prototipo durante el proceso de desinfección.
- **Lámpara UV:** Durante el desarrollo del proyecto se utilizó una lámpara de marca NUAIRE ubicada en las instalaciones del laboratorio de microbiología de la universidad Santo Tomás permitiendo la simulación de luz ultravioleta en las longitudes de onda próximas a 253.7 nanómetros actuando como factor germicida por las afecciones que genera en la estructura molecular de los microorganismos.
- **Turbidímetro:** Un turbidímetro es un instrumento nefelométrico que mide la turbiedad causada por partículas suspendidas en un líquido. Haciendo pasar un rayo de luz a través de la muestra se mide la luz reflejada por

las partículas en un ángulo de 90° con respecto al rayo incidente. Las lecturas se dan en Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU). El turbidímetro permite obtener lecturas promedio, además de las instantáneas, que evitan lecturas erróneas causadas por las fluctuaciones que producen grandes partículas al pasar por el haz de luz.

Imagen 14: Turbidímetro HI 88713- 02



Fuente: [40]

Turbidímetro HI 88713- 02

El turbidímetro de mesa tiene una gran pantalla que cumple todas las exigencias para medir la turbiedad in situ. El turbidímetro tiene un sistema óptico de última generación que garantiza un resultado preciso, estabilidad a largo plazo y minimiza la luz parásita y las interferencias de color.

- Display gráfico, LCD iluminado
- Calibración en 2,3,4 o 5 puntos
- LCD Retro-iluminado
- Funciones GLP

7.2.3. Unidades

- UFC/ml: es una unidad de medida empleada en la cuantificación de microorganismos, es decir, el número de bacterias viables en una muestra líquida o sólida.
- Factor de supervivencia: Fracción de bacterias sobrevivientes en un tiempo determinado, para una muestra o un proceso determinado.

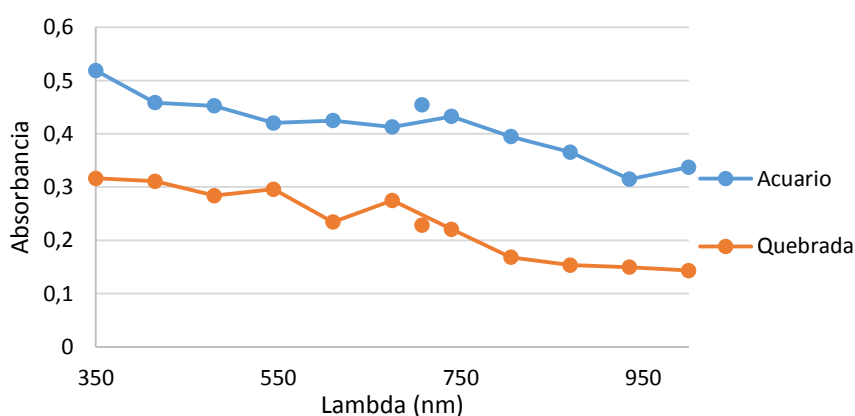
7.2.4. Pruebas en laboratorio- Bacterias del acuario y la quebrada

Para valorar y determinar la eficiencia tanto de los materiales como del tratamiento se realizaron una serie de pruebas en laboratorio con variables

controladas que permitieron elaborar un protocolo de muestreo más eficiente teniendo en cuenta la cantidad de tubos que serían expuestos.

Este proceso inicia con la aplicación del método de medición de absorbancia el cual comienza con la calibración de la longitud de onda base para cada tipo de muestra durante el proceso de muestreo. Está es fundamental para realizar los análisis de absorbancia en el espectrofotómetro ya que en este se mide la cantidad de energía radiante que absorben las muestras de agua en función de la longitud de onda, según los resultados de las mediciones de absorbancia de las muestras de agua de la quebrada y el agua del acuario (ubicado en las instalaciones del laboratorio de microbiología), a diferentes longitudes de onda, se encontró que las bacterias de la quebrada y el acuario tienen valores de absorbancia cercanos a la longitud de onda de $\lambda=650\text{nm}$, que es el valor reportado de absorbancia del *E. coli*, lo que justifica que en el desarrollo del proyecto se utilice esta longitud de onda (650nm) para evaluar las muestras extraídas en laboratorio y en el prototipo ya instalado.

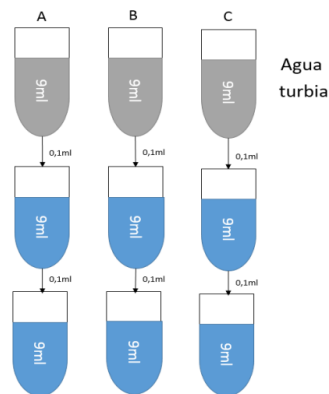
Gráfica 4: Determinación de la longitud de onda base durante todo el proceso de muestreo.



Fuente: Autor

Con el fin de determinar valores de densidad bacteriana con precisión, se implementó el método diluciones decimales seriadas, método en el cual se inicia con la preparación de una solución con mayor concentración de bacterias a la que se le denomina “solución madre”, a partir de esto se realizan diluciones bacterianas sucesivas en 9 ml de agua de la quebrada en tubos de ensayo como se evidencia en la imagen 15, después de realizar las diluciones se procede a sembrar 0,1ml de cada dilución (tubo de ensayo) previamente agitado en el medio de cultivo PCA (Plate Count Agar), que es un medio de cultivo recomendado para el recuento de bacterias aeróbicas aguas residuales y alimentos, especificaciones del medio de cultivo en el Anexo D, se utilizó este medio por su coloración ya que al remover las bacterias de otros medios tiñen el agua a desinfectar y lo que se quiere es que el agua este lo menos turbia posible.

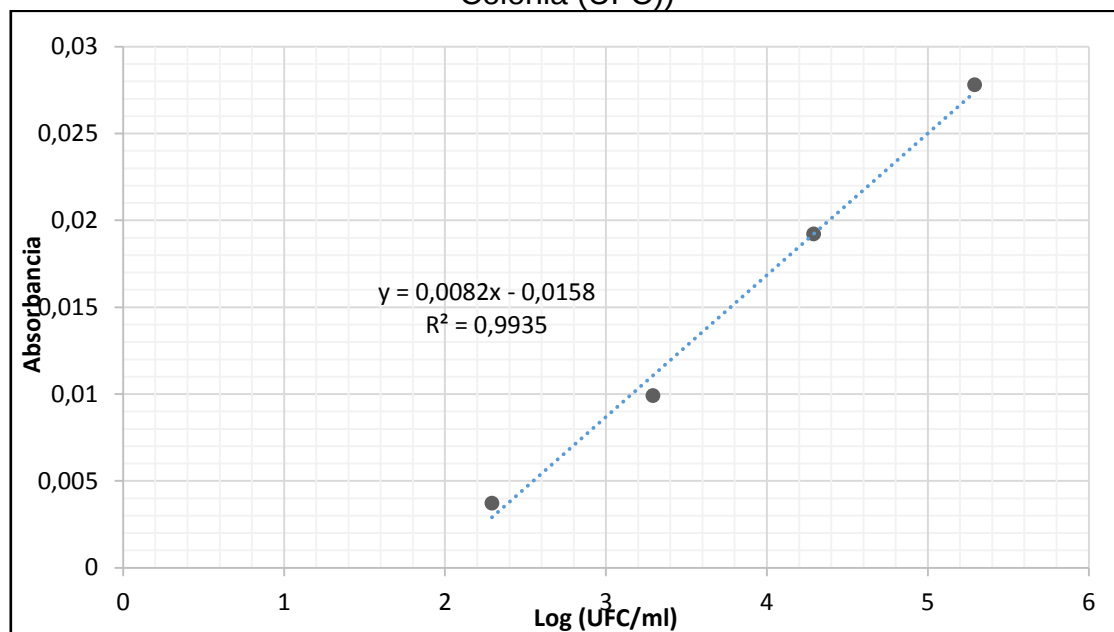
Imagen 15: Diluciones seriadas



Fuente: Autor

Teniendo las siembras se procede a realizar el análisis de absorbancia (A_λ) debido a que a mayor cantidad de microorganismos en la muestra menor es la cantidad de luz que pasa por la muestra de agua. Posterior a esto se comparan gráficamente los resultados de absorbancia y de unidades formadoras de colonia (UFC) producto del conteo de cada siembra, como se observa en la gráfica 5. Con la aplicación de este método se reduce el tiempo necesario para la obtención de resultados, ya que la ecuación presente en la gráfica 5 relaciona y: absorbancia con x: la concentración de bacterias. Entonces, reemplazando el valor de absorbancia de cada muestra extraída durante el desarrollo del proceso de desinfección en esta ecuación ($y = 0,0082x - 0,0158$), puede obtenerse el valor de concentración de bacterias, debido a que la concentración es directamente proporcional a la absorbancia.

Gráfica 5: Curva de calibración (absorbancia vs Unidades Formadoras de Colonia (UFC))

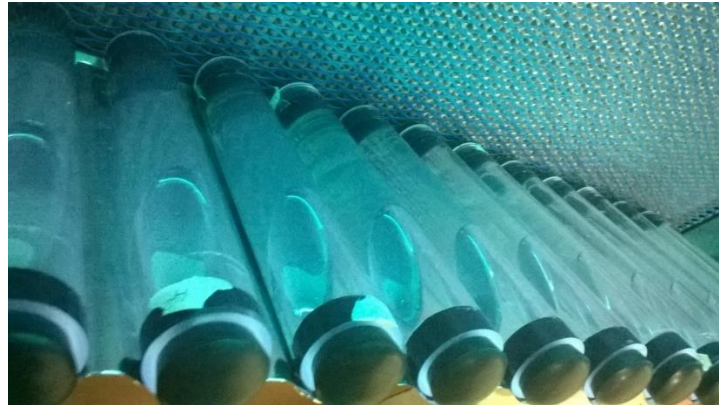


Fuente: Autor

A partir de lo anterior se procede a tomar los datos de absorbancia de 12 tubos de cuarzo a los cuales se le agregan 250ml de agua de la quebrada, con el fin de analizar las variaciones que se pueden presentar en el proceso de desinfección con diferentes concentraciones de microorganismos se aplica el método de diluciones seriadas a tres soluciones madre que posteriormente serán agregadas a los tubos. Para observar el comportamiento normal del proceso sin agregado de bacterias se dejan los últimos tres tubos únicamente con agua de la quebrada.

Después de tener todos los tubos de cuarzo marcados y llenos, cada uno con 259ml de agua con la lámina de zinc debajo para que aumente la concentración de radiación que recibe cada tubo, fueron expuestos a una lámpara de luz ultravioleta que tiene una longitud de onda de radiación en el rango germicida (223 - 302 nm) como se observa en la imagen 16 [41].

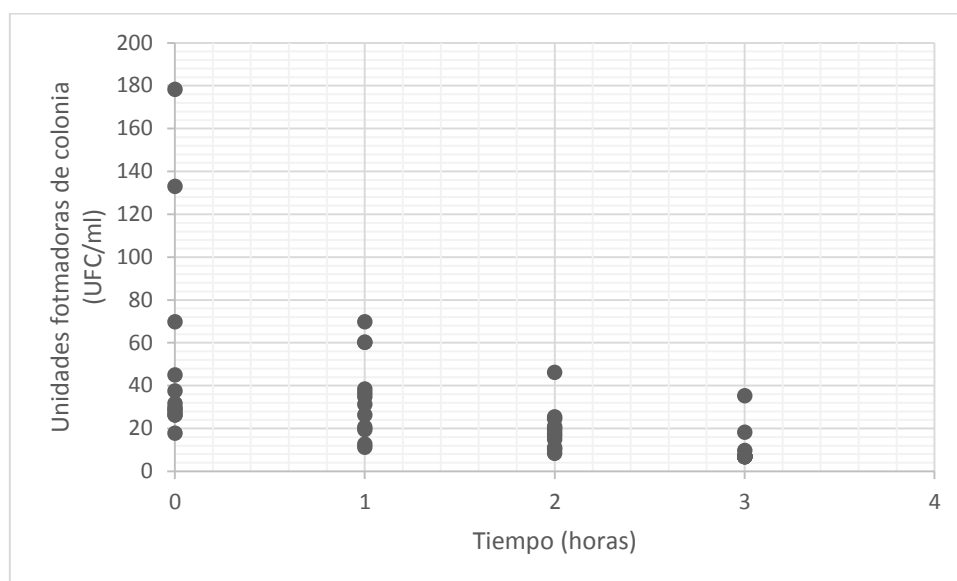
Imagen 16: Exposición de las muestras a lámpara UV ubicada en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás.



Fuente: Autor

Se tomaron muestras iniciales y a partir del momento en el que se encendió la lámpara y se realizó un muestreo por hora para observar el comportamiento de la supervivencia bacteriana al ser expuesta a altas intensidades de radiación con una longitud de onda en el rango germicida de la radiación con respecto al tiempo de exposición. Se registraron los valores de absorbancia de cada muestra y se reemplazaron en la ecuación de la recta en gráfica 5 y con los resultados de concentración de bacterias (UFC) en cada hora se evidenció el comportamiento de supervivencia que se muestra en la gráfica 6, es importante observar que como los resultados de la ecuación dan un valor en logaritmo de UFC se debe convertir a valor de población.

Gráfica 6: Resultados del proceso de desinfección utilizando lámpara UV.

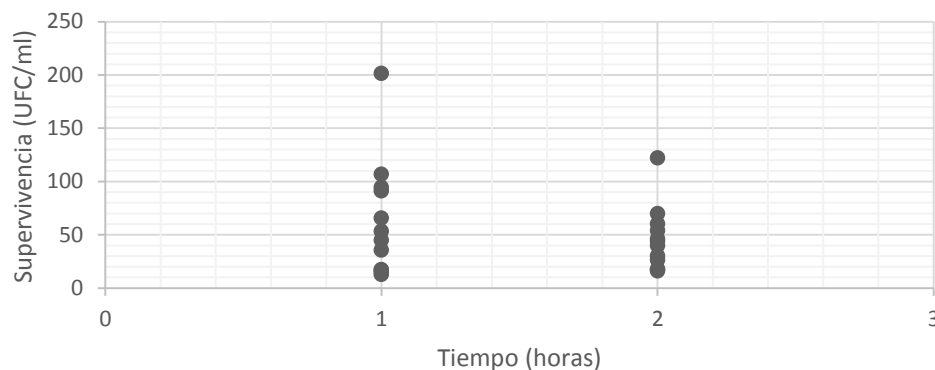


Fuente: Autor

A lo largo del proceso de toma de muestras se evidenció que después de las tres horas los valores de absorbancia de las muestras a las que se le agregaron diferentes concentraciones de microorganismos tienden a tomar valores cercanos a cero, lo que significa que los valores de absorbancia de las muestras tomadas en la tercera hora de exposición son similares a los valores del experimento control (agua de la quebrada sin adición de muestras de bacterias concentradas diluidas en 9ml de agua). Los tubos fueron expuestos otras dos horas pero los valores de absorbancia de las muestras extraídas fueron comparados con los valores de absorbancia de agua destilada la cual fue establecida como experimento control durante las dos horas de experimentación.

En la gráfica 7 se puede observar que el proceso de desinfección es más lento al aplicar el proceso a la población sobreviviente con la misma intensidad de radiación (después de tres horas de exposición) y al tomar agua destilada como base en la comparación de valores de absorbancia.

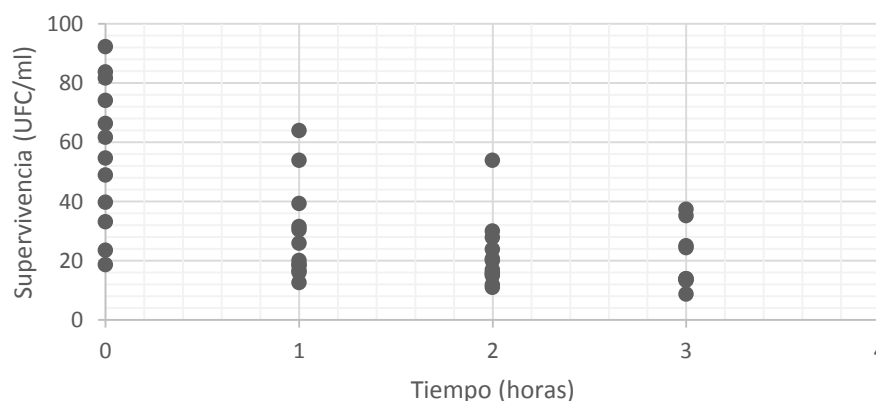
Gráfica 7: Resultados de supervivencia tomando como referencia agua destilada teniendo en cuenta la población restante.



Fuente. Autor

Con el fin de observar el comportamiento de supervivencia bacteriana se dejan los tubos sin exponer a radiación UV durante 24 horas y se observa que al exponer las muestras de agua nuevamente a la radiación de la lámpara UV, el proceso de desinfección es más lento con respecto a los resultados obtenidos del primer muestreo.

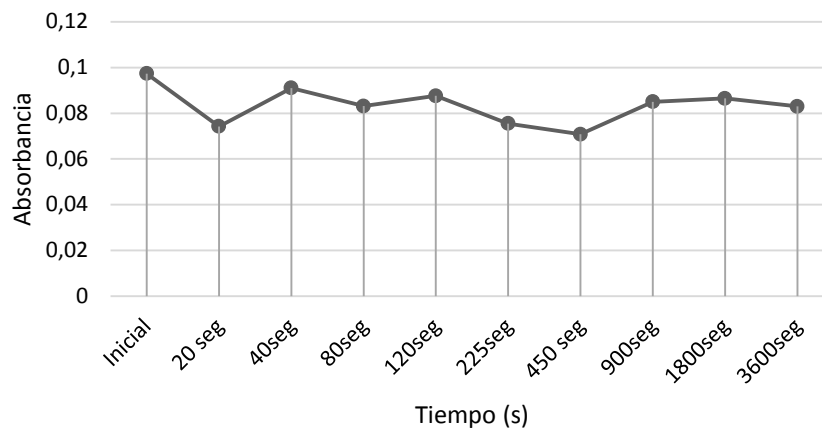
Gráfica 8: Comportamiento de la supervivencia bacteriana después de 24 horas sin exposición



Fuente: Autor

A partir de la comparación con los valores de UFC obtenidos 24 horas antes y los valores iniciales de UFC de la gráfica 8 se encontró que al transcurrir un tiempo sin presencia de radiación aumentaba el número de colonias con respecto a los resultados del último muestreo del día anterior. A partir de esto y según la teoría se realizaron pruebas con “pulsos” de radiación lo que indica que mientras se extraían las muestras de cada tubo sin radiación con el fin de identificar variaciones en el comportamiento del proceso de desinfección. El proceso inicio con el primer análisis a los 20 segundos ya que según estudios previos en este intervalo de tiempo (para el rango de radiación germicida) se inactiva el mayor número de colonias de microorganismos. Los resultados de este proceso se observan en la siguiente gráfica:

Gráfica 9: Comportamiento de supervivencia con pulsos de radiación iniciando en 20(s)

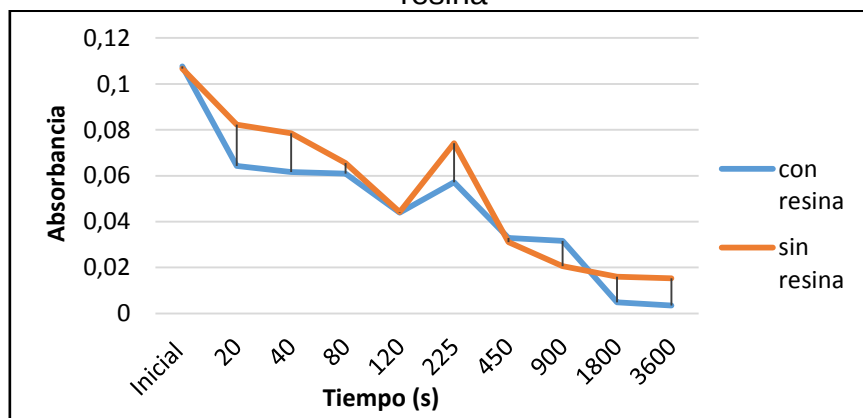


Fuente: Autor

A medida que se realizaron las pruebas en laboratorio se encontró que los tapones de caucho huecos de color negro seleccionados inicialmente no son aptos para este tipo de desinfección ya que impiden que los microorganismos que estén en el interior de este sean irradiados con la radiación. A partir de esto se procede a confirmar esta hipótesis.

Se rellenaron dos tapones con resina y se lijaron de tal forma que la superficie quedara uniforme y se dejaron otros con las mismas características iniciales y con estos se exponen los tubos con el fin de observar la diferencia del comportamiento de los microorganismos con tapones huecos y con tapones con resina como se observa en la gráfica 10:

Gráfica 10: Comparación entre pruebas con tapones huecos y tapones con resina



Fuente: Autor

A partir de esta gráfica que confirma la hipótesis de que los tapones de caucho huecos albergan colonias de bacterias se tomó la decisión de modificar los tapones por unos tapones lisos hechos de acrílico transparente.

7.6. FASE 3: Diseño del prototipo de desinfección solar

Principalmente se tuvo en cuenta que el prototipo de desinfección solar debía tener una posición vertical, replicando el comportamiento de folotaxis descusada (imagen 11) por lo tanto definieron aspectos importantes como el diseño de la estructura principal de soporte así como la selección de materiales resistentes y de fácil montaje.

Se consideraron parámetros como la selección de los contenedores de agua, el diseño de las láminas reflectoras de radiación y las medidas adecuadas de los perfiles que soportaran el sistema, esto se debe tener en cuenta para cada “hoja”.

7.3.1. Determinación de las dimensiones del prototipo (árbol) de desinfección solar

Fue necesario realizar un diseño integral y eficiente, en donde se tengan en cuenta todos los análisis de resistencia, soporte, rigidez y datos de dimensionamiento de cada uno de los paneles (hojas) y las 18 ramificaciones del prototipo.

En esta parte se determinaron la longitud y diámetro de la estructura principal del prototipo incluyendo la selección del método más adecuado para la fijación de cada una de las piezas que lo componen para esto se deben tener en cuenta los siguientes parámetros de construcción del prototipo:

- Viabilidad en el montaje, desmontaje y mantenimiento del prototipo
- Resistencia de la estructura principal
- Permitir el fácil aseguramiento a la estructura de cada una de las piezas
- Las ramas de los árboles posicionadas de forma escalonada de tal forma que no se presenten cruces en las ramificaciones que puedan ser generadores de sombra.
- La base debe proporcionar equilibrio y soporte de acuerdo al peso de la estructura
- Tener en cuenta fundamentalmente los principios filotácticos.

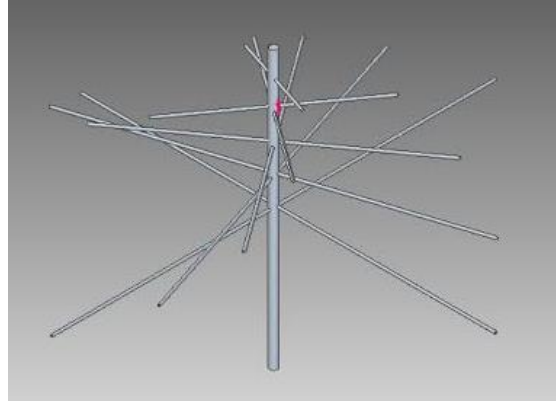
Considerando el parámetro que corresponde al posicionamiento de las “hojas” se estableció que el diseño debía seguir los principios de la filotaxis descusada pero que presentó un ángulo de divergencia cada dos nudos seguidos de 20° que corresponde al ángulo de distancia que debe tener cada rama superpuesta a otra como se ve en la imagen 17. Esto se determinó por medio de la ecuación 3, todo esto se realizó con el propósito de evitar la presencia de sombra en alguna parte del prototipo:

$$\text{angulo de divergencia} = \frac{360^\circ}{\#ramas} \quad (3)$$

A partir de esto se estableció que la longitud de las ramas debe aumentar 30cm cada dos nodos, que corresponde al largo de cada una de las hojas, así mismo

se decidió que las piezas que representan las hojas estarán ubicadas en los extremos, todo esto se realiza con el fin de permitir que la radiación solar llegue a todas las piezas como se muestra en la siguiente imagen:

Imagen 17: Estructura principal del prototipo (árbol) de desinfección solar



Fuente: Autor

- Cálculo de los pesos que intervienen sobre la base del árbol

El tronco del árbol corresponde a un tubo de acero de 2" de diámetro para equilibrar las varillas corrugadas que cumplen con la función de ramas, es importante resaltar que este material fue seleccionado debido a que soporta grandes pesos. De acuerdo a esto, se determinó el peso total del prototipo de desinfección solar iniciando con la sumatoria de los pesos de cada uno de los paneles ya armados, teniendo en cuenta que el peso de cada panel es de 100g.

Por lo tanto:

$$P_{(Th)} = (\Sigma P_h * N_R) \quad (4)$$

Dónde:

P_{Th} = Peso total de paneles en el árbol

P_h = Peso de cada hoja (panel).

N_R = Número de ramas

Después de esto se determina el peso de la estructura principal sumando los pesos totales de hojas, más los pesos totales de las ramas (varillas corrugadas), teniendo en cuenta que son de longitudes distintas y esto genera variaciones en los pesos de cada una de las ramas, más el peso del tubo principal como se muestra en la ecuación (5) para así calcular el peso total del prototipo.

$$P_{(TP)} = P_{(Th)} + (\Sigma P_R * N_R) + P_t \quad (5)$$

Dónde:

P_{Tp} = Peso total del prototipo

P_R = Peso de cada rama

N_R = Número de ramas

P_t = Peso del tronco

Teniendo en cuenta el peso total de la estructura se determinan las dimensiones de la base de la estructura de tal forma que se pueda soportar el peso y la estructura quede completamente estable.

7.3.2. Dimensiones de los paneles

Inicialmente se tomaron las medidas del tubo contenedor de agua para determinar el largo de la lámina, teniendo en cuenta los costos, el nivel de reflectancia y resistencia se seleccionó una teja de zinc como reflector de radiación. Para darle soporte a la hora de incorporar este sistema al árbol se arma una base como se muestra a continuación:

Imagen18: Base de la “hoja” que soporta el peso del contenedor de agua y la lámina que refleja la radiación.



Fuente: Autor

Previo a esto se realizó una selección del material del soporte de la lámina por medio de una matriz de comparación (tabla 6) en la cual se tienen en cuenta parámetros como la eficiencia de cada material, que para el proyecto hace referencia a la resistencia, oxidación, elasticidad entre otras. Según la información obtenida se establece que por accesibilidad y peso el más adecuado para el prototipo es el aluminio.

Tabla 6: Comparación entre materiales para el soporte de “la hoja” que será la base del contenedor de agua y la lámina reflectora.

Material	peso específico (g/cm ³)	resistencia a tracción (N/mm ²)	limite elástico (N/mm ²)	Maleable	Resistente a la corrosión
Aluminio	2,7	250-300	270	Sí	No
Acero	7,85	370-620	240-360	Sí	No

Fuente: autor

A partir de la siguiente tabla (tabla 7), se determinaron de las dimensiones de cada parte de la hoja está basadas en las medidas del tubo de cuarzo que va a contener de agua, a partir de esto y de la selección del material del soporte (tabla 6), se establecen las dimensiones presentadas a continuación:

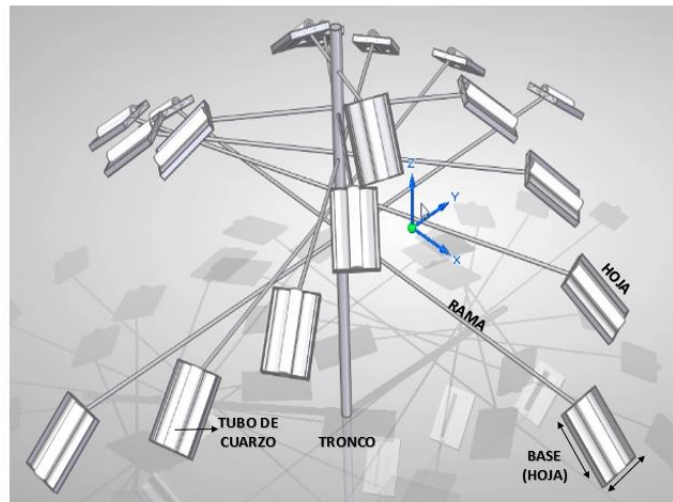
Tabla 7: Dimensiones de las partes del prototipo de desinfección solar

Tubo de cuarzo cm	Lámina de zinc (cm)	Soporte (cm)
Diámetro interno: 5cm	Largo: 30	Largo: 1
Largo: 30m	Ancho: 20	Ancho: 17,5

Fuente: Autor

La base (imagen 18) tiene 1 cm más de largo con respecto a las dimensiones del tubo de cuarzo (contenedor de agua a tratar), esto se debe a que los tapones que sellan el tubo generan 0,5 cm de más en cada extremo, por otro lado, se establece que el ancho del soporte debe ser inferior al de la lámina con el fin de que la lámina quede en posición de redirigir la radiación al tubo y no genere sombra al tubo en ningún momento del día.

Imagen19 Diseño final del prototipo de desinfección solar



Fuente: Autor

7.7. FASE 4: Construcción y pruebas del prototipo

Imagen 20: Prototipo de desinfección armado según medidas de diseño.



Fuente: Autor

En esta fase se construyó el prototipo con las medidas establecidas en el diseño virtual, pero se presentó una variación en la altura general de la estructura midiendo 165cm de alto, por lo tanto también se realizaron cambios en el diámetro y el largo de las varillas que cumplen con la función de “ramas” en el prototipo, dando como resultado las medidas presentadas en la tabla 8, estas medidas se presentan desde el piso superior (primer piso) hasta el piso inferior (quinto piso).

Tabla 8. Dimensiones de construcción de las varillas (ramas)

	Diámetro (cm)	Largo (cm)
Primer piso (dos hojas)		30
Segundo piso (cuatro hojas)		60
Tercer piso (Cuatro hojas)	0,762	90
Cuarto piso (Cuatro hojas)	1,27	120
Quinto piso (Cuatro hojas)	1,27	150

Fuente: Autor

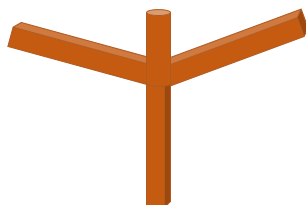
7.7.3. Instalación

En esta sección se describen cada una de las instrucciones y los pasos que se siguieron en el montaje de la estructura. Es importante identificar todas las partes del árbol antes de empezar a ensamblar.

Paso 1: Base del árbol:

Inicialmente se desplegaron las patas del trípode que brinda equilibrio y soporte al peso de la estructura, luego se ubicó en un área plana preferiblemente libre de obstáculos que generen sombra.

Fig. 1 Trípode que corresponde a la Base del prototipo

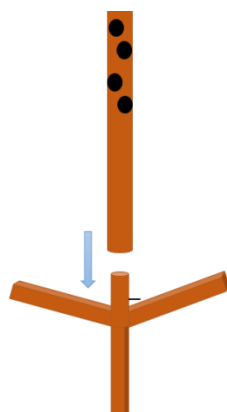


A la base se le agregó un tornillo que cumplió con la función de “tope” para evitar daños en las soldaduras de la base y a su vez proporciono altura a la estructura.

Paso 2:

Se insertó el tronco en la base y ajusto correctamente. El tronco consta de un tubo de acero con perforaciones que fueron dispuestas de acuerdo al número y al diámetro de las ramificaciones del árbol.

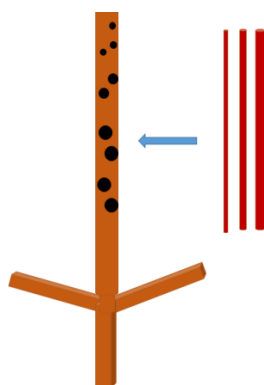
Fig. 2 Ensamble de la base con el tronco del prototipo



Paso 3:

Se insertaron las ramificaciones (varillas de acero) en el tronco, identificando primero cual es la varilla que corresponde a cada orificio del tronco.

Fig. 3 Ensamble de varillas (ramas) al tronco del prototipo



Paso 4:

Unir las hojas a las ramas, en esta parte se tuvo en cuenta que cada hoja tiene una varilla de base que esta doblada de tal forma que la hoja tenga un ángulo de 37° de inclinación con respecto a la rama de acuerdo a la orientación del sol. Para unir estas piezas se asignaron dos amarras por cada hoja para unir las a la rama. En este paso se tuvo en cuenta que las amarras deben coincidir con el diámetro de la rama.

Fig. 4 Instalación de amarras en cada varilla del prototipo



Paso 5:

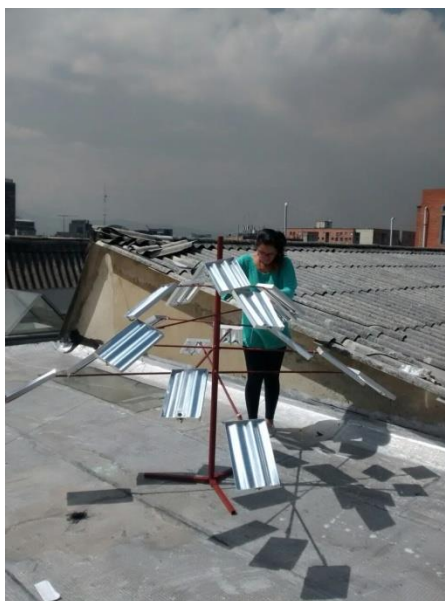
Se aseguró cada hoja, se revisó que quedara bien ajustada toda la estructura para contrarrestar los efectos del viento de la zona en donde se instaló el

prototipo de desinfección de agua (terraza Edificio c de la sede central de la Universidad Santo Tomas).

Paso 6:

Después de haber ensamblado el árbol siguiendo los pasos anteriores fueron acoplados los tubos porta muestras a cada hoja dispuesta para realizar el proceso de desinfección por radiación solar.

Imagen 21 Estructura instalada en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás



Fuente: Autor

- **Recomendaciones de instalación:**

1. Durante el montaje es importante instalar la estructura base y posteriormente las ramas. Se sugiere insertar las varillas corrugadas (ramas) de abajo hacia arriba a lo largo del tronco.
2. Deben alinearse las varillas de tal forma que ninguna le genere sombra a otra inferior se sugiere asegurarlas con una amarra plástica.
3. Es importante ajustar correctamente los acoplamientos porque si alguno queda suelto la hoja entera se caerá rompiendo los contenedores de agua.

- **Piezas de repuesto:**

El árbol viene con dos acoples para cada hoja a la medida de cada varilla y en caso de pérdida vienen con amarras plásticas y de acero de repuesto.

7.7.4. Mantenimiento

Todos los materiales, expuestos a la acciones de las condiciones ambientales sufren a mayor o menor grado modificaciones en sus características, gracias a

la acción de los fenómenos físicos y químicos que se desencadenan en la pieza a partir de la exposición. En algunos casos estas modificaciones generan cambios en el funcionamiento de las estructuras, por esta razón es indispensable buscar el material adecuado y disponer de los medios adecuados para aminorar los efectos de las variables ambientales.

Las estructuras de acero están sometidas a la oxidación, fenómeno que genera corrosión o desgaste de las piezas hechas con este material, por este motivo deben tomarse las medidas adecuadas para garantizar el funcionamiento de estas durante su vida útil. A continuación se explicarán las medidas que se deben tomar teniendo en cuenta los materiales de la estructura.

Protección de las piezas en acero contra la corrosión

La vida útil de las piezas depende básicamente del tipo de material con el que fueron fabricados, de la forma que tienen y de la protección que se les dé contra los efectos de calor y humedad provocados por la exposición al sol. En el caso de las piezas de acero de esta estructura una protección realizada con un recubrimiento de pintura es más sencilla, efectiva y apropiada de acuerdo con el diseño de la estructura planteada.

Condiciones de diseño

Considerando la corrosión como principal fuente de desgaste se establecen algunas reglas para el diseño con el fin de mejorar la resistencia de la estructura a la corrosión. Estas son:

- ~ En el diseño se propone que las partes se puedan reemplazar y reparar fácilmente
- ~ Las partes con curvaturas muy pronunciadas se plantearon con un material que no sufra efectos de corrosión, en este caso se seleccionaron ángulos de aluminio.
- ~ Para el diseño se proponen tubos huecos en la estructura con el fin de evitar un aumento en los niveles de corrosión por el contacto y posible aglomeración de aguas lluvias en el interior del tubo.

Clasificación de los ambientes corrosivos

Para prevenir la corrosión la materia y así alargar la vida útil del prototipo es muy importante determinar con exactitud las condiciones ambientales a la que estará expuesta la estructura y a partir de esto se establecen cuatro categorías de exposición en donde [42]:

- Categoría 1: es la exposición más agresiva (agentes químicos como el **Ácido Sulfúrico** (H_2SO_4) que puede llegar a corroer el acero y condiciones atmosféricas, si hay presencia constante de agua lluvia desgasta el acero).
- Categoría 2: Exposición no tan frecuente a agentes químicos y condiciones atmosféricas.
- Categoría 3: Exposición ocasional.

- Categoría 4: Corresponde a la exposición a agentes atmosféricos únicamente.

Según esta clasificación el nivel de exposición del prototipo es 4 ya que la estructura está expuesta únicamente a fenómenos naturales propios del ambiente y libre de ataques generados por productos químicos. En este punto se debe aclarar que las temperaturas elevadas aumentan los efectos de la corrosión y pueden llegar a deteriorar la protección basada en recubrimientos aplicados a las estructuras [42].

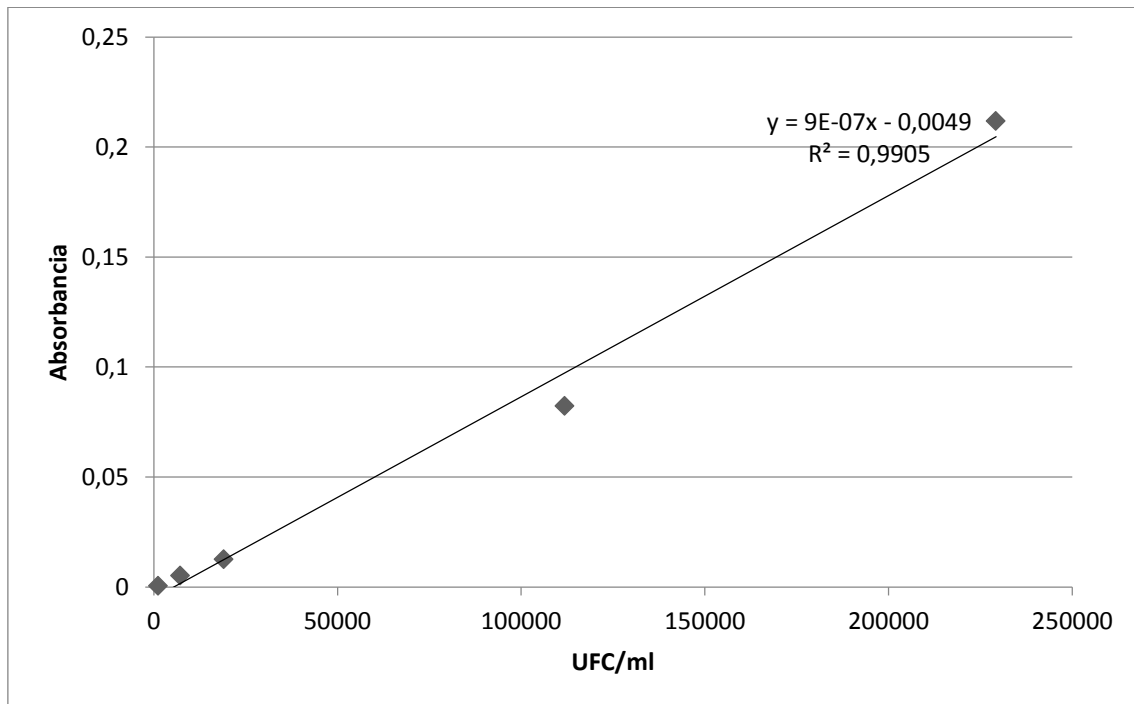
Recomendaciones

En este sistema de protección con recubrimiento se utilizó una base anticorrosiva. Esta es considerada como el componente más importante del sistema de protección ya que entre sus características principales se encuentra su alto nivel de resistencia a la corrosión y además de esto se le aplicó un recubrimiento de refuerzo. Pero teniendo en cuenta que la estructura está expuesta a temperaturas elevadas y estas disminuyen la efectividad del sistema se sugiere realizar una revisión periódica y si es necesario reparar con recubrimientos los daños encontrados.

7.7.5. Pruebas con *Escherichia Coli*

Para realizar las pruebas en campo con el propósito de comparar los resultados con el modelo fenomenológico que mejor se ajuste al comportamiento de desinfección observado a partir de los resultados de las muestras tomadas en campo, se procede a aislar la *Escherichia coli* con el método de siembra por cuadrillas explicada en el Anexo F en medio de cultivo Mac Conkey para hacer los experimentos únicamente con este tipo de bacteria. Una vez aislados los microorganismos, se implementa el método de diluciones decimales seriadas descrito en la sección 6.2.3, teniendo como muestra madre agua con solución salina (0,85%), lo que indica que por cada litro de agua se deben agregar 0,85g de cloruro de sodio, con grandes concentraciones de *E.coli*, que aumenten la turbiedad del agua. Posterior a esto se determinan las absorbancias de cada dilución en el espectrofotómetro, en donde cada dilución es comparada con una muestra blanco que en este caso fue el agua con solución salina, teniendo en la misma longitud de onda establecida en la literatura de 650nm y se hace el conteo bacteriano para cada dilución y se obtienen las imágenes presentadas en el Anexo E, representados en la gráfica 11 los cuales fueron la base en la obtención de los resultados de las muestras extraídas en campo, tomando el valor de absorbancia de cada muestra y reemplazándolo en la ecuación de la gráfica 11, en donde se compara el conteo bacteriano (*E.coli*) con los valores de absorbancia de cada muestra ($y=9^{-7}x-0,0049$) se obtienen valores de concentraciones de bacterias de cada muestra.

Gráfica 11: Calibración absorbancia vs UFC/ml (*E.coli*) aplicando método de diluciones seriadas.



Fuente: Autor

7.7.6. Pruebas del tratamiento en campo

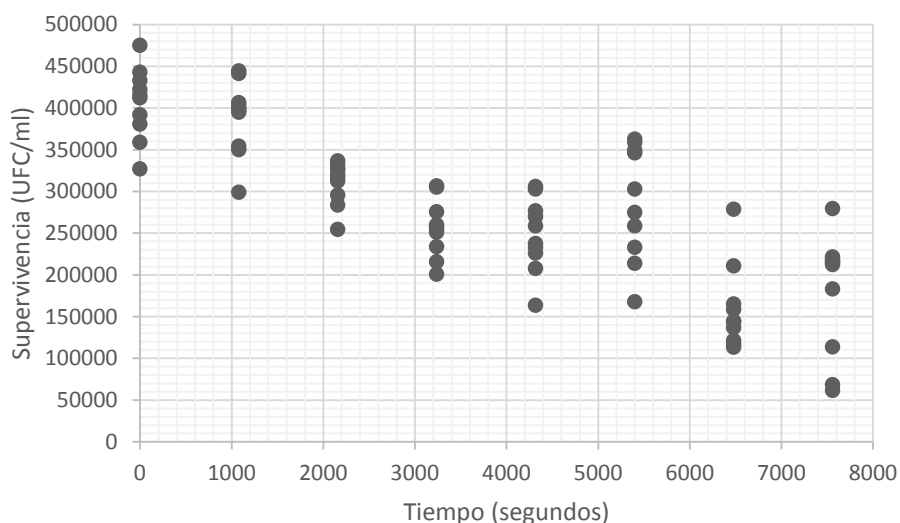
Teniendo en cuenta que las condiciones varían y que la radiación no es la misma todo el tiempo se realizan pruebas para identificar el comportamiento de las colonias de *E.coli* a lo largo del proceso de desinfección exponiendo el prototipo a radiación solar, ubicándolo en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás y tomando muestras para determinar concentraciones bacterianas a partir de valores de absorbancia, como de intensidad radiación con el fin de implementar un modelo que contemple variables seleccionadas en el desarrollo del proyecto y que permita predecir un comportamiento.

Inicialmente se tenía previsto tomar varias muestras antes de los 20 segundos ya que en las pruebas de laboratorio en este período fue donde se inactivó una mayor fracción de microorganismos, pero tomando valores de intensidad cada hora durante un período de una semana se encontró que la intensidad solar no es constante cada hora, por lo tanto se determinó que muestrear en este período de tiempo no era tan relevante en condiciones externas.

A partir de lo anterior se realizó el primer muestreo donde se extraen 10 ml de agua cada 18 minutos para posteriormente hacer análisis de absorbancia y determinar cuántas unidades formadoras de colonia se inactivan. En este primer día de muestreo se presentaron pocas horas con presencia de luz solar y se obtuvieron los siguientes resultados:

En la gráfica 12 se puede observar un cambio en el número de colonias de microorganismos pero es una reducción mínima al pasar el tiempo esto se debe a la ausencia de sol durante el periodo de muestreo.

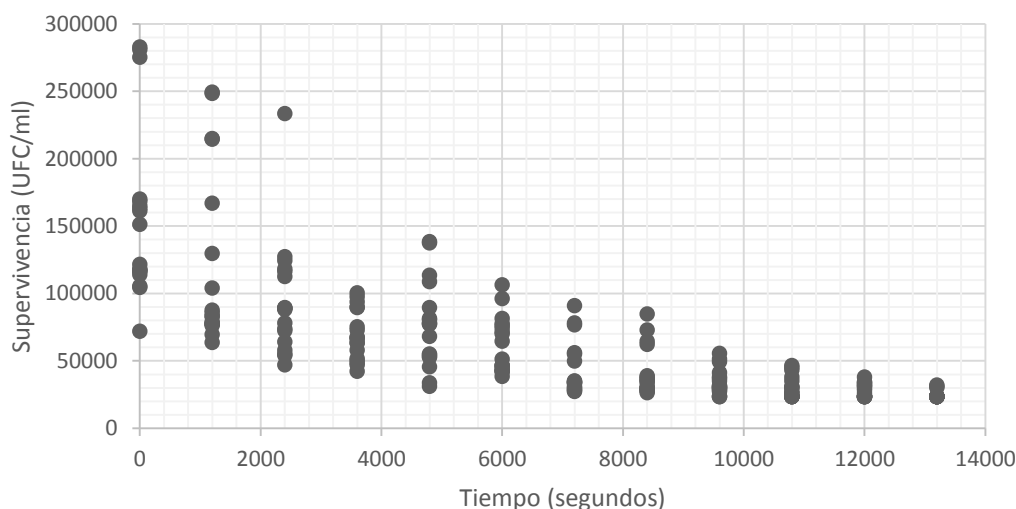
Gráfica 12: Resultados primer muestreo (nublado)



Fuente: Autor

En el segundo muestreo se toman los mismos períodos de tiempo que en el muestreo anterior (18 minutos) y se extraen los mismos 10 ml en este caso se presentaron más períodos soleados durante el muestreo lo generó un cambio significativo en la inactivación de microorganismos al transcurrir tres horas de exposición se observó que los valores de absorbancia oscilaron alrededor de cero y al reemplazar los valores de absorbancia de cada muestra con la ecuación ($y=9^{-7}x-0,0049$) arrojada por la gráfica de calibración (gráfica 11) que ajusta el conteo de *E.coli* con valores de absorbancia por cada muestra, se obtienen las concentraciones que se mostrarán a continuación en la gráfica 13 .

Gráfica 13: Segundo muestreo del proceso de desinfección en campo, con presencia de períodos soleados



Fuente: Autor

En la gráfica 13 se observa una caída más rápida en los valores de supervivencia en comparación con el primer muestreo, esto probablemente debido a una mayor intensidad de radiación durante el periodo de exposición. Durante las exposiciones se observó la aparición de burbujas y vapor en el agua presente al interior del tubo de cuarzo como se observa en la imagen 22.

Imagen 22: Aparición de burbujas de gas durante exposición a radiación solar.

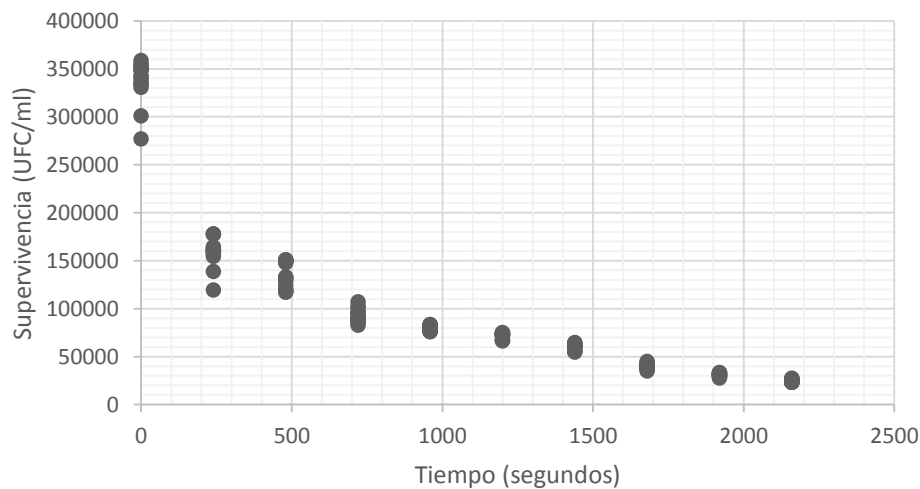


Fuente: Autor

En el tercer muestreo se buscó un período de exposición en el que la intensidad lumínica presentara valores elevados de acuerdo a los valores obtenidos del luxómetro y a datos de predicción presentados por el IDEAM. En este muestreo se acortaron los tiempos de exposición, para procurar que las intensidades fueran constantes con el fin de observar el comportamiento a una intensidad constante. Al obtener concentraciones de bacterias (UFC/ml) a partir de los valores de absorbancia extraídos de cada muestra reemplazándolos en la ecuación resultado de la gráfica de calibración ($y = 9E-07x - 0,0049$) se observa una reducción de 216668,496 UFC/ml teniendo en cuenta los promedios del muestreo inicial y los promedios del muestreo final.

En la gráfica 14 se evidencian picos de decaimiento en los primeros 240 segundos debido a que en este período inició un aumento considerable en la intensidad lumínica y ya que la intensidad fue constante durante el muestreo como se observa en el anexo G, se evidenció que los resultados fueron satisfactorios ya que los valores de absorbancia en el último intervalo de tiempo fueron cercanos a cero lo que indica esta reducción de la intensidad de luz absorbida por la muestra implicando la disminución en la concentración bacteriana de la muestra en comparación con el agua base (sin adición de bacterias).

Gráfica 14: Resultados tercer muestreo del tratamiento con valores altos de intensidad lumínica.



Fuente: Autor

7.7.7. Aplicación de modelos fenomenológicos

Con el fin de brindar una descripción profunda del proceso de desinfección solar, se presentan una serie de modelos matemáticos de base fenomenológica que representan y describen el comportamiento del proceso y de cada uno de los parámetros que intervienen directamente en el sistema evaluado durante el desarrollo de este proyecto en pruebas de laboratorio y en campo.

Se implementaron varios modelos durante este proceso precisando la interpretación de los valores de supervivencia obtenidos en laboratorio con la intensidad de la lámpara y en las muestras tomadas al prototipo ubicado en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás lo que facilitó la interpretación y análisis de los resultados de concentración de bacterias (UFC/ml) durante varios periodos de exposición.

En la matriz 1 se comparan varios modelos que permiten representar gráficamente la relación directa entre la supervivencia y el tiempo de exposición, teniendo en cuenta los valores de intensidad tomadas durante los experimentos realizados en laboratorio y en campo. En esta matriz se analizan los enfoques, los parámetros que intervienen en cada modelo y la aplicación de cada uno a los resultados de las muestras tomadas a lo largo de este proyecto.

Matriz 1: Descripción y análisis de los modelos implementados

MODELOS	Decaimiento microbiano	Decaimiento dos etapas (two stage)	Emerik y Collins	Modelo de Weibull
EXPLICACIÓN	Es un modelo exponencial clásico donde se observa el comportamiento de la supervivencia bacteriana bajo la influencia de algún agente germicida, en este modelo se tiene en cuenta únicamente la población bacteriana que presenta vulnerabilidad a la exposición. [43] [44]	En este modelo no solo se tiene en cuenta la población que sucumbe a los efectos de la exposición, sino que también tiene en cuenta esa pequeña fracción que presenta algún tipo de resistencia, en donde supervivencia total es la suma de la curva de decaimiento rápido en donde la mayoría es vulnerable, más la curva de decaimiento lenta (minoría es resistente) por lo tanto. [45]	En este modelo se contempla el número de partículas presentes en el agua que albergan bacterias y no permiten que la radiación solar llegue a estas haciendo que esta población resista los efectos de la exposición. [46]	Este modelo que representa la probabilidad de supervivencia bacteriana hasta el tiempo t, en este modelo se ajusta únicamente los componentes ensayados. [46]
ECUACIÓN	$S = e^{-kIt}$	$S = (1 - f) e^{-K1It} + f^{-k2It}$	$N_t = N_t e^{-KIt} + \frac{N_t}{KIt} - \frac{N_p}{KIt} e^{-KIt}$	$\log_{10} N_t = \log_{10} N_0 - \left(t/\delta\right)^p$
PARAMETROS	Dónde: K: constante de velocidad de inactivación estándar ($\text{cm}^2/\mu\text{j}$), I: Intensidad UV ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$), t: Tiempo de exposición (segundos). [44]	Dónde: K: constante de velocidad de inactivación estándar ($\text{cm}^2/\mu\text{j}$), I: Intensidad UV ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$), t: Tiempo de exposición (segundos), f: fracción resistente a los efectos de la radiación solar. [43] [44]	Dónde: N_t : Número de bacterias sobrevivientes después de la exposición, N_0 : Número inicial de bacterias libres (no asociadas a partículas), N_p : Número total de partículas que contienen una o más bacterias, K: es la constante de velocidad de inactivación ($\text{cm}^2/\mu\text{j}$), I: Intensidad ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) y t: Tiempo (segundos) [46]	Dónde: N: La población bacteriana residual en un tiempo de exposición determinado (UFC/ml), N_0 : La población inicial (UFC/ml), t: tiempo de exposición en segundos, δ : es un parámetro de escala y marca el tiempo para la primera reducción por lo tanto cuando δ es mayor, es mayor el intervalo de tiempo en el que se producirán las muertes, p: factor forma si $p < 1$ se describen curvas cóncavas y $p > 1$ describe curvas convexas. [46]

Resultados de los modelos

- **Modelo de decaimiento microbiano**

Teniendo valores de intensidad constante proveniente de la lámpara ($7,738 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) y los tiempos de medición se procede a buscar en la literatura los valores de las constantes F, K1 (velocidad de inactivación) y K2 (velocidad de inactivación fracción resistente), para el tipo de bacteria utilizada durante el proceso de desinfección, aplicando el modelo a estos parámetros se obtienen los siguientes resultados [47].

Tabla 9: Aplicación del modelo de decaimiento microbiano

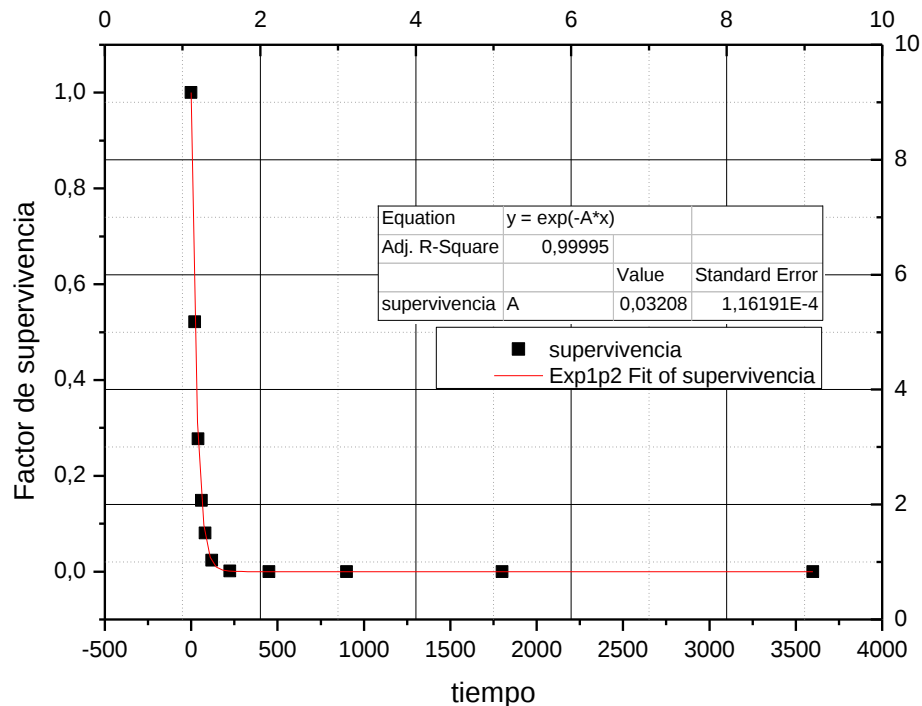
Microorganismo	F	(1-f)	K1($\text{cm}^2/\mu\text{j}$)	K2($\text{cm}^2/\mu\text{j}$)	I:intensidad ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	t=Tiempo de exposición (s)	Supervivencia (S):
E.coli	0,917	0,083	0,008	0,004	7,738	20	0,522
						40	0,277
						60	0,149
						80	0,080
						120	0,024
						225	0,001
						450	1E-06
						900	1E-12
						1800	1E-24
						3600	2E-48

Fuente: Autor

A continuación se representa gráficamente el ajuste del modelo de decaimiento a los datos de laboratorio, utilizando para el proceso de desinfección la lámpara de radiación germicida descrita en la sección 6.2.2 ubicada en el laboratorio de microbiología de la Universidad Santo Tomás. Los microorganismos expuestos a la radiación UV presentan una disminución exponencial de la población como se observa en la gráfica 15.

Según el ajuste realizado se puede observar en la gráfica 15 una caída rápida en la población de bacterias al ser expuesta el agua a una intensidad alta de $7,739 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ en el rango germicida (223-302nm), es importante tener en cuenta que la intensidad fue constante durante todo el proceso de desinfección por esta razón se ve este comportamiento en la inactivación de bacterias.

Gráfica 15: Ajuste datos de exposición en laboratorio a $7,738 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ - modelo Decay



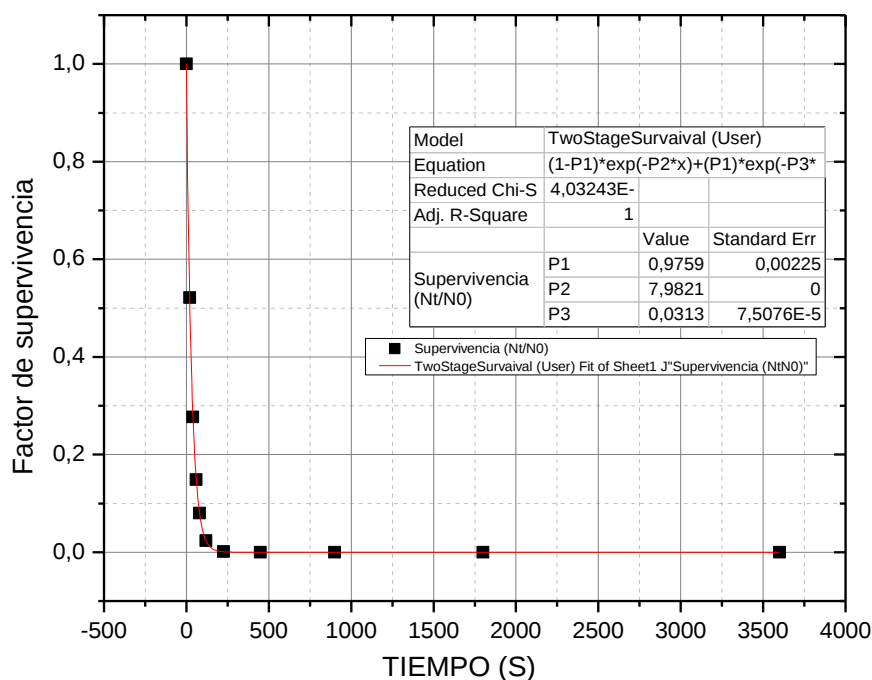
Fuente: Autor

- **Modelo de dos etapas**

Se probaron varios modelos para el ajuste de los resultados obtenidos en laboratorio y se evidenció que este es el que presenta el mejor ajuste, esto se debe a que la lámpara utilizada en el tratamiento Genera una intensidad constante de $7,738 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, logrando resultados de inactivación en tiempos cortos de exposición como se observa en la gráfica 16 y a que este modelo tiene en cuenta a la fracción de la población microbiana que genera algún tipo de resistencia y que implica un proceso de desinfección más lento.

En la gráfica 16 se evidencian claramente las dos etapas de desinfección a lo largo de la exposición y se obtiene un coeficiente de determinación (r^2) de 1 lo que indica un ajuste perfecto de los datos obtenidos de supervivencia bacteriana a la exposición con radiación germicida constante, por otro lado se observa que en el período de 0 a 250 segundos se inactiva un factor de 0,4783585 de inactivación de la población presente en el agua expuesta y a partir de este tiempo empieza un descenso poblacional lento lo que corresponde a esa fracción de bacterias que genera algún tipo de resistencia a los efectos de la radiación UV.

Gráfica 16: Ajuste datos de experimento en laboratorio a $7,738 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ aplicando el modelo “Dos etapas”



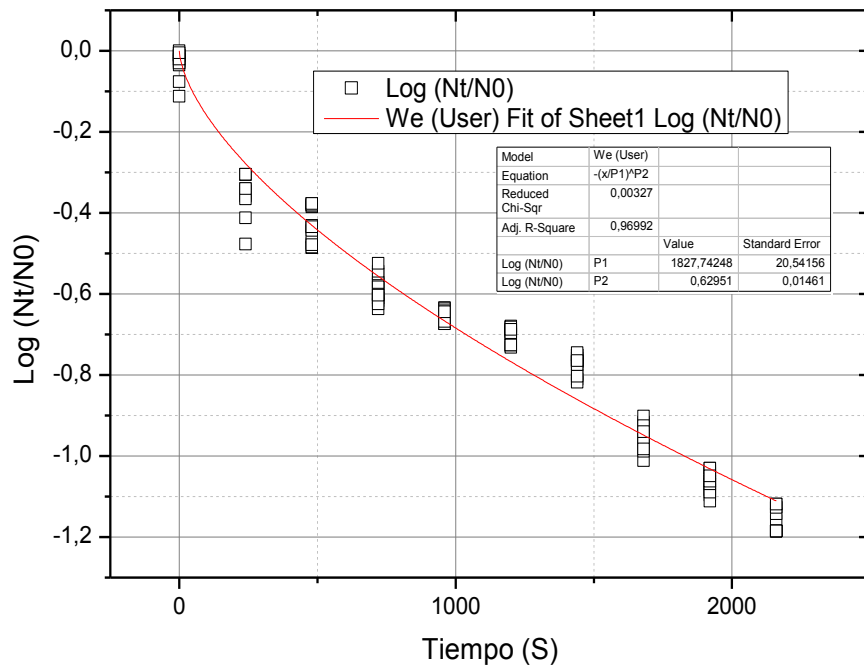
Fuente: Autor

- **Modelo de Weibull**

A partir de lo anterior se buscó un modelo que se ajustara a los valores arrojados por las muestras en campo, en donde las intensidades de exposición son esporádicamente bajas. El modelo de Weibull se implementó por la diversidad de formas que este puede llegar a tomar dependiendo de los parámetros característicos del sistema como en este caso la supervivencia de bacterias y el tiempo de exposición como se explica en el anexo H, lo que le da una gran versatilidad en el análisis de datos. A continuación (gráfica 17) se presenta los resultados de la aplicación del modelo a tres experimentos realizados en campo.

En la gráfica 17 de eficiencia de desinfección en escala logarítmica se obtiene un ajuste del 96% con una disminución exponencial lenta de población de *E.coli*, este porcentaje de ajuste indica una alta correlación entre los valores de los parámetros experimentales. El valor de p (factor forma) es de 0,629 un valor menor que 1, lo que indica que la curva de supervivencia decrece de forma cóncava haciéndose notable la dependencia de la severidad del proceso de desinfección solar, El factor escala (δ) representa el valor de la variable análoga utilizada en el experimento que en este caso es el tiempo de exposición con un valor de 1827 lo que indica el intervalo de tiempo en el cual se producirán las inactivaciones.

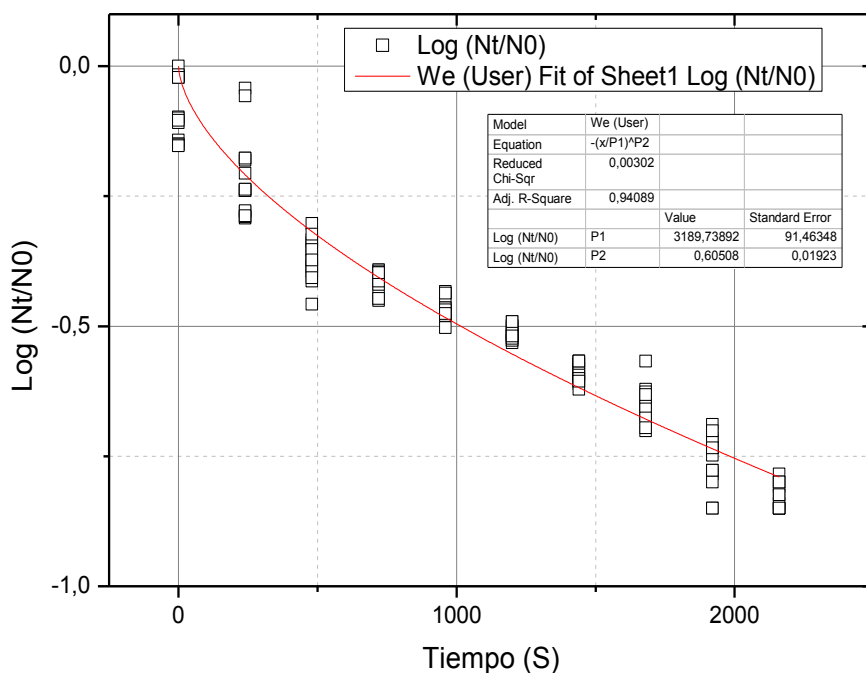
Gráfica 17: Ajuste del modelo de Weibull aplicado a los resultados del segundo muestreo realizado en campo



Fuente: Autor

En el tercer muestreo (gráfica 18) se observa una correlación de 94% entre los datos de densidad poblacional ($\log n_t/n_0$) y el tiempo lo que indica que el modelo es apropiado para representar los valores de supervivencia de *E.coli* al aplicar el tratamiento. El valor de p (factor forma) es de 0,60 un valor menor que 1, lo que muestra concavidad en decrecimiento bacteriano esta concavidad indica que las células más sensibles son las que mueren más rápido mientras que la población que genera algún tipo de resistencia necesita más tiempo de exposición al tratamiento o de la aplicación de otro tipo de método de desinfección ya que pueden llegar a adaptarse al tratamiento aplicado. El factor escala ($\delta=3189$) indica que son cortos los intervalos de tiempo en los que ocurre el evento.

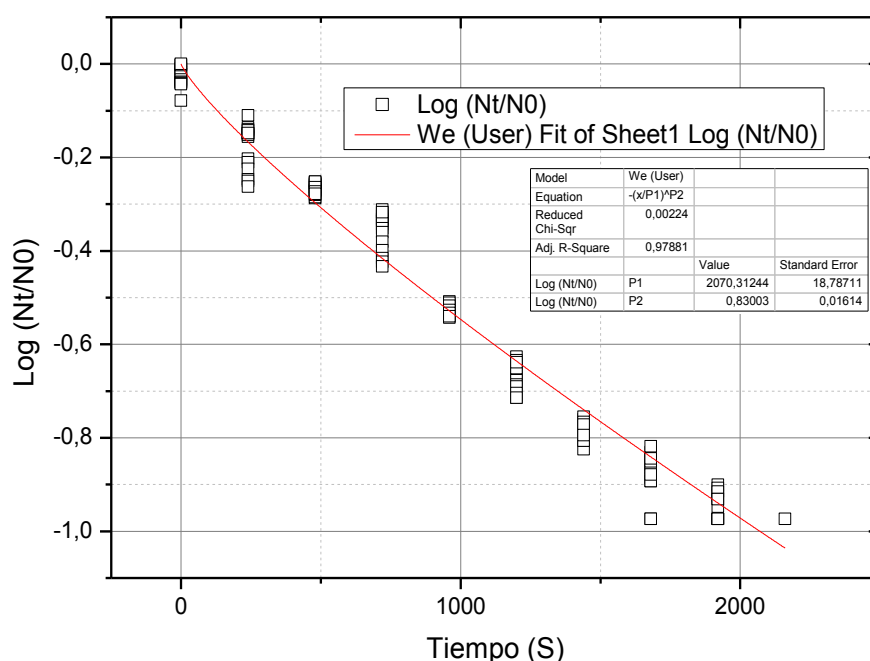
Gráfica 18: Ajuste muestra 3 en campo- modelo de Weibull



Fuente: Autor

En el cuarto muestreo el coeficiente de determinación ($r^2 = 0,97$) es altamente significativo lo que indica que el modelo de Weibull es adecuado para representar los valores de supervivencia obtenidos de las pruebas en campo esto se debe a que este modelo contempla que la velocidad de inactivación no es constante debido a las variaciones climáticas, la curva de supervivencia muestra concavidad con un valor de $0,83 < 1$ haciéndose más notable en dependencia del rigor del tratamiento de desinfección por radiación solar, esta concavidad indica que la fracción de población más sensible a la radiación solar sucumbe rápidamente a sus efectos en comparación con la población que genera algún tipo de adaptación al tratamiento. Al igual que en los otros resultados de muestras, el valor del parámetro δ indica menores intervalos de tiempo de ocurrencia de la inactivación. Como se observa en la gráfica 19.

Gráfica 19: Ajuste del modelo de Weibull aplicado a los resultados del cuarto muestreo realizado en campo



Fuente: Autor

En las gráficas de los datos obtenidos en campo a las que se les aplicó el modelo de Weibull se observó que, debido a las bajas intensidades de la radiación solar en los días del muestreo el comportamiento de inactivación presenta una caída lenta en comparación con los modelos de decaimiento y decaimiento en dos etapas. Por otro lado se tiene en cuenta que los intervalos de tiempo de muerte son largos en comparación con los de los arrojados por las muestras de laboratorio esto influye en el valor δ en el modelo y en la caída de las gráficas de los datos en campo comparadas con lo observado con las representaciones de los modelos de decaimiento y decaimiento de dos etapas.

La aplicación de este modelo es importante ya que simplifica el manejo de información de supervivencia y permite predecir el comportamiento del proceso de desinfección en condiciones de radiación no controladas.

En la tabla 10 se muestra el análisis del ajuste y la descripción de los modelos fenomenológicos a las muestras realizadas en laboratorio y a las extraídas del prototipo argumentando la importancia de cada uno de estos modelos al proyecto.

Tabla 10: Descripción del ajuste de los modelos fenomenológicos a los resultados de las muestras del proyecto.

MODELOS	Decaimiento microbiano	Decaimiento dos etapas (two stage)	Emerik y Collins	Modelo de Weibull
APLICACIÓN A LOS DATOS DEL PROYECTO	Este modelo se ajusta a los datos de laboratorio en donde se utiliza la lámpara UV con radiación germicida constante de $7,738 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, el modelo se ajusta debido a que la supervivencia bacteriana tiene una caída rápida y esto se atribuye en gran medida a la intensidad. Este modelo no se ajusta a los datos en campo debido a que la intensidad en el momento de muestreo fue baja ($0,45 \mu\text{W}/\text{cm}^2$), en comparación con la de la lámpara y por lo tanto la caída de supervivencia es más lenta.	Este modelo presenta un mejor ajuste con un R^2 de 0,99, esto se debe a que tiene en cuenta las dos etapas de la caída de supervivencia la inicial (rápida) y final (lenta) en donde se tiene en cuenta la fracción resistente. Por otro lado este modelo no se ajusta a los datos de campo ya que este modelo inicialmente tiene en cuenta las bacterias vulnerables en intensidades altas y durante el muestreo la intensidad no logra obtener valores altos y constantes lo que genera una caída de supervivencia lenta.	Se evidencio que este modelo no ajusta al realizar el análisis de utilizando los datos de las muestras del experimento realizado en campo, esto se debe a que el modelo contempla la presencia de grandes cantidades de partículas y el agua expuesta es de la lámina superficial del agua de la quebrada, en donde la presencia de partículas generadoras de sombra es mínima, ya que tiene una turbiedad de 19,3NTU y la turbiedad de agua pre filtrada es de 26NTU [2].	Este modelo es muy flexible y está asociado principalmente a variables del tiempo de vida de los microorganismos expuestos y busca analizar la eficiencia de la desinfección e inactivación de bacterias al ser expuestas a radiación solar, este modelo se ajusta más a las muestras de campo ya que este modelo trabaja en términos de "población registrada versus tiempo de exposición" y no en términos de intensidad ya que en las pruebas en campo las intensidades fueron bajas ($0,45 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) en comparación a las de la lámpara del laboratorio.

Fuente: Autor

8. IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO

En este documento se plantea una propuesta innovadora en donde por medio de un cambio en el diseño del reactor se obtiene una mayor eficiencia en el proceso de desinfección de agua, manteniendo su viabilidad económica.

El avance en el estudio del método SODIS ha resultado en niveles más altos de eficiencia en cuanto a la desinfección del agua, variando los materiales de los reactores y su ubicación con respecto al sol. Estudios recientes evidencian que el patrón de distribución de las ramas en el tronco del árbol permite una mayor captación de la radiación solar. Juntando estos dos resultados se podría aumentar los niveles de desinfección del agua, lo que podría resultar en un prototipo que se pueda implementar en diferentes lugares en donde no se cuenta con servicios de potabilización del agua.

El diseño se plantea como una medida de mitigación a los problemas de salud generados por el consumo de aguas que no cuentan con ningún tratamiento de desinfección en áreas rurales que no tienen acceso a agua potable y como una opción de mejoramiento y desarrollo de la técnica SODIS no solo por el diseño sino también porque se tendrán condiciones climáticas diferentes a las que se presentaban en las pruebas realizadas anteriormente.

9. CONCLUSIONES

- En comparación con artículos de experimentos realizados previamente se evidenció que los tiempos de exposición se reducen al implementar el prototipo
- Al realizar una comparación entre los resultados obtenidos en el laboratorio con los contenedores de cuarzo y los resultados encontrados en la literatura con contenedores PET (4 horas de exposición), bajo las mismas condiciones, se encontró una reducción de una hora en el tiempo de exposición.
- Aunque aumentan los costos por el cambio del contenedor de agua que pasa de ser una botella PET a ser un tubo de cuarzo este se ve compensado con una desinfección más eficiente ya que el material permite un aumento en la penetración de radiación en el agua, se disminuye el riesgo de liberación de elementos nocivos a la salud por efectos del sol y con un período de vida útil mayor.
- La elaboración de una curva de calibración de absorbancia vs unidades formadoras de colonia por mililitro, por medio de la aplicación del método de diluciones decimales seriadas, permite establecer un protocolo de monitoreo más eficiente ya que a partir de valores de absorbancia de cada muestra tomada se puede obtener un valor de concentraciones bacterianas presentes en las muestras del agua a la que se le aplica el proceso de desinfección.
- Los modelos fenomenológicos aplicados sirven como una herramienta de ayuda para próximos estudios, diseños y construcción de sistemas de desinfección solar, para efectos del proyecto el modelo de WEIBULL presenta un mejor ajuste a las condiciones reales del prototipo debido a que tiene en cuenta únicamente los tiempos de ocurrencia de muerte al realizarse el tratamiento por método SODIS y no un valor de intensidad constante como en el caso de los modelos de DECAY y TWO STAGE, lo que es más acorde a las intensidades de la zona.

10. RECOMENDACIONES

- Para evitar aumento en el tiempo de inactivación se sugiere emplear tapones transparentes que permitan el paso de la radiación al contenedor de agua, ya que el uso de tapones de color o que sean huecos impiden que los microorganismos que estén en el tapón sean irradiados.
- Para asegurar una adecuada desinfección es importante que “las hojas” tengan una inclinación de 37° teniendo en cuenta la posición del sol, ya que esto permite que la radiación solar llegue a todo el sistema.
- Para que el tratamiento sea efectivo se debe instalar el prototipo en un área que presente un mínimo de obstáculos que puedan llegar a ser generadores de sombra en algún momento del día.
- Es importante tener en cuenta que la intensidad debe ser constante o debe estar dentro de un rango a la hora de realizar la toma de muestras ya que una variación en la intensidad genera un cambio en el comportamiento de supervivencia de bacterias.
- Se recomienda en próximos estudios tomar medidas de temperatura dentro del contenedor con el fin de establecer el comportamiento de la temperatura en el agua, también se recomienda identificar las muestras de cada tubo con el fin de establecer el comportamiento del proceso de desinfección de cada tubo y establecer una relación de este con el posicionamiento del sol.

11. REFERENCIAS

- [1] IDEAM, «Estudio nacional de agua,» 2014.
- [2] m. w. Regula Mehierhofer, Desinfección solar del agua- guía de aplicación, http://www.sodis.ch/methode/anwendung/ausbildungsmaterial/dokumente_material/manual_s.pdf.
- [3] D. d. pueblo, Informe defensorial 39B-Diagnóstico sobre la calidad del agua para el consumo humano en Colombia, <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/foro4/06Informe.pdf>.
- [4] UNICEF, El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo, <http://www.unicef.org/colombia/pdf/Agua3.pdf>.
- [5] Profamilia, «Encuesta nacional de demografía y salud,» Bogotá, 2010.
- [6] N. J. Rose, «The golden mean and Fibonacci numbers,» 2014.
- [7] Organización panamericana de la salud, *Guía para la selección de sistema de desinfección*, 2007.
- [8] Agencia ambiental de los Estados Unidos de América- USEPA-, *Desinfección del agua*, 2002.
- [9] S. K. Wayne Heaselgrave, «Antimicrobial activity of simulated solar disinfection against bacterial, fungal and protozoan pathogens and its enhancement by riboflavin,» 2010.
- [10] L. V. O. D. C. M.-A. Mariana Muñoz Restrepo, Microbicidal effect of solar radiation (SODIS) combined with *Artemisia annua*, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [11] R. M. y. M. Wegelin, «Desinfección Solar del Agua- Guía de aplicación,» [En línea]. Available: http://www.sodis.ch/methode/anwendung/ausbildungsmaterial/dokumente_material/manual_s.pdf.
- [12] O. p. d. l. salud, « Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental,» [En línea]. Available: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/desinfeccion/capitulo2.pdf>.
- [13] M. F.-S. Hipólito Gomez-Couso, «Effect of the radiation intensity, water turbidity and exposure time on the survival of *Cryptosporidium* during simulated solar disinfection of drinking water,» *Acta tropica*, 2009.
- [14] F. d. C. O. G. Andrea Rodrigues Marques, «Efficiency of PET reactors in solar water disinfection for use in southeastern Brazil,» 2012.
- [15] M. T. A.-H. Alejandra Martín-Domínguez, «Efficiency in the disinfection of water for human consumption in rural communities using solar radiation,» *Solar energy*, 2005.

- [16] M. F.-S. H. Gómez-Cousoa, «Speeding up the solar water disinfection process (SODIS) against *Cryptosporidium parvum* by using 2.5 l static solar reactors fitted with compound parabolic concentrators (CPCs),» *Acta tropica*, 2012.
- [17] A. A. Muna Hindiye, «Investigating the efficiency of solar energy system for drinking water disinfection,» *Desalination*, 2010.
- [18] S. K. O.A. McLoughlin, «Solar disinfection of contaminated water: a comparison of three small-scale reactors,» *Solar energy*, 2004.
- [19] M. F.-S. H. Gómez-Cousoa, «Comparison of different solar reactors for household disinfection of drinking water in developing countries: evaluation of their efficacy in relation to the waterborne enteropathogen *Cryptosporidium parvum*,» *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 2012.
- [20] M. K. R. M. S. L. M. W. Peter Schmid, «Does the reuse of PET bottles during solar water disinfection pose a health risk due to the migration of plasticisers and other chemicals into the water?,» *Solar energy*, 2008.
- [21] E. U.-J. C. Navntoft, «Effectiveness of solar disinfection using batch reactors with non-imaging aluminium reflectors under real conditions: Natural well-water and solar light,» *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2008.
- [22] J. R. Barrios, Entradas y transporte de materia orgánica en una quebrada tropical de montaña. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [23] A. Dawyer, «The Secret of the Fibonacci Sequence in Trees,» *American Museum of Natural History*.
- [24] New wind, «New wind,» Jérôme Michaud-Larivière, 2015. [En línea]. Available: <http://www.newwind.fr>.
- [25] D. T. Morimitsu, Diseño de un generador eólico de eje vertical de baja potencia, pereira, 2015.
- [26] P. Miramontes, «La Biología Matemática,» *Facultad de ciencias, UNAM*.
- [27] D. B. Adler, «A History of the Study of Phyllotaxis,» *Annals of Botany* 80, 1997.
- [28] C. S. Irene Ferrando, «La sucesión de Fibonacci como herramienta para modelizar la naturaleza,» *Modelling in Science Education and Learning*, p. 46, 2010.
- [29] T. A. K. César Augusto Blanco, La hoja- morfología externa y anatomía, Córdoba: Universidad Nacional de Rio Cuarto, 2004.
- [30] Univesidad nacional de mexico, *Filotaxis, patrones estructurales en plantas*, 2007.
- [31] V. V. Martinez, «LA SORPRENDENTE SUCESIÓN DE FIBONACCI,» [En línea]. Available: <http://vviana.es/doc/LaSorprendente%20SucesionDeFibonacci.pdf>.
- [32] M. E. B. Fernando Cobalán Yuste, «La proporción: Arte y matemáticas,» Barcelona,

GRAÓ, 2010, p. 119.

- [33] IDEAM, *Cartas climatologicas-medias mensuales*, Santa fe de Bogotà, 2000.
- [34] IDEAM, «IDEAM,» 2015. [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.
- [35] «AccuWeather,» [En línea]. Available: www.accuweather.com.
- [36] «SunEarth,» [En línea]. Available: www.sunearthtools.com.
- [37] I. C. V. Pacheco, «La exposición a rayos UV,» *Revista de Gestión, Salud y Trabajo*, 2012.
- [38] Universidad de viena, «Instructivo de verificacion de la calibracion del turbidimetro,» *Biorem*, 2010.
- [39] Analisis y soluciones ambientales S.A, «ANSAM,» [En línea]. Available: http://www.ansam.com.mx/productos/espectrofotometros_colorimetros.html.
- [40] PCE-instruments, [En línea]. Available: www.pce-instruments.com.
- [41] M. J. Pelczar, *Laboratory Exercises in Microbiology*, New York: Mc Graw Hill, 1977.
- [42] Norma técnica colombiana 1335, «Pinturas tipo emulsión,» 2015.
- [43] A. T. G.H. Smerage, *Journal of Industrial Microbiology*, 1993.
- [44] W. J. KOWALSKI, «Mathematical Modeling of Ultraviolet Germicidal,» *Quantitative Microbiology*, p. 253, 2002.
- [45] T. I. H. Fujikawa, *Applied Microbiology*, 1996.
- [46] E. D. A. E. C. C. P. Stefanos Giannakis, «Solar disinfection modeling and post-irradiation response of Escherichia coli in wastewater,» *Elsevier*, 2015.
- [47] W. J. Kowalski, «Mathematical modeling of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection,» *Quantitative Microbiology*, 2001.
- [48] M. Jure, «Detección, aislamiento y caracterización de Escherichia coli productor de toxina Shiga a partir de carne molida fresca proveniente de carnicerías de Concepción, provincia de Tucumán,» 2010.
- [49] «Chapter 2 - Survival analysis,» [En línea]. Available: <https://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/habil-online/07/07H056/t3.pdf>.
- [50] J. Fox, «Introduction to survival analysis,» 2014.
- [51] C. D. y. T. Stucki, «Parametric Survival Models,» 2011.
- [52] Naciones Unidas Nueva York, «Objetivos de Desarrollo del Milenio informe de 2015,» pp. 51-61, 2015.

- [53] C. I. d. I. p. e. D. d. C. (IDRC), Movilización de recursos- guía practica para organizaciones comunitarias y de investigación, Venture for Fund Raising, 2010.
- [54] Ministerio de desarrollo económico , «Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento basico,» *Ras 2000- Título B*, p. 45, 2000.
- [55] M. F. y. A. C. Alfonso Sanabria, «Operación y mantenimiento de sistemas de abastecimiento de agua,» p. 5, 3 febrero 2010.
- [56] N. C. Giraldo, «Acueductos comunitarios: Patrimonio social y ambiental del Valle de Aburrá,» *Universidad Nacional de Colombia*, p. 57, 2009.
- [57] Organizacion mundial de la salud, «Quantitative microbial risk assessment, Application for water safety management,» 2016.
- [58] Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas.
- [59] S. L. Á. d. N. M. M. E. T. M. Mireya del Pilar Arcos Pulido, «Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua.,» *Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca*, 2005.
- [60] M. M. M. Pérez, «Morfología y estructura bacteriana,» 2008.
- [61] [En línea]. Available: <http://www.sunearthtools.com/>.
- [62] OriginLab Corporation, <http://www.originlab.com/>, 1992.

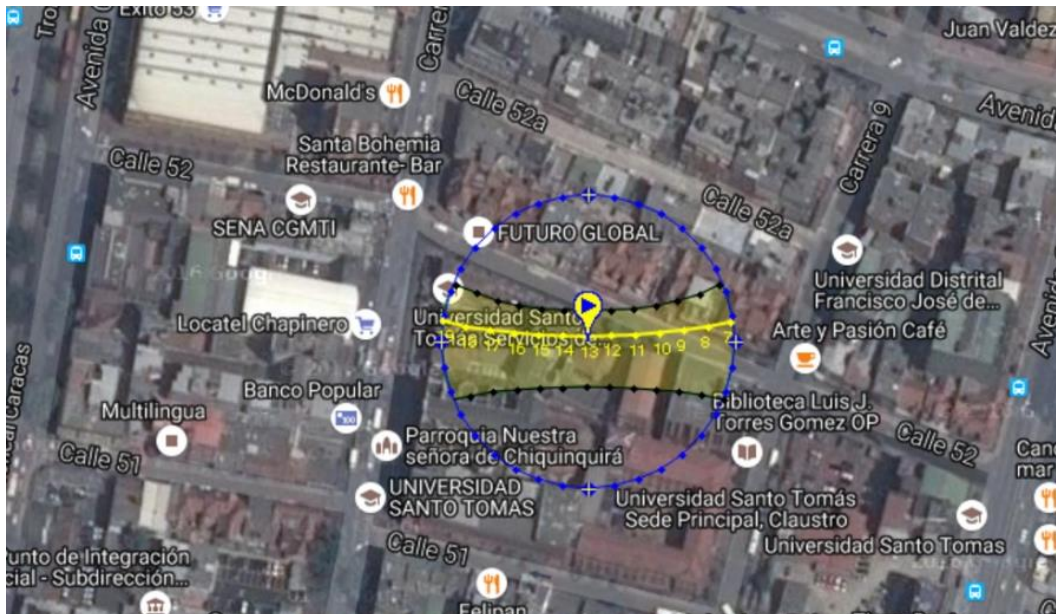
ANEXO A

Imagen del fotómetro utilizado en el experimento



ANEXO B

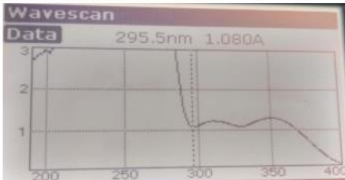
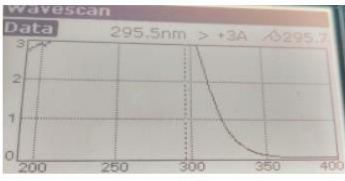
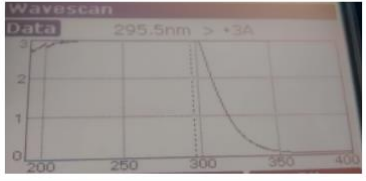
Mapa de trayectoria de radiación solar, en el cual se evidencia el posicionamiento del sol en cada hora del día en el mes de diciembre en el cual se realizaron las pruebas en campo.



Fuente: [36]

ANEXO C

Gráficas de absorbancia de cada material, estos resultados nos permiten comparar el comportamiento absorbancia de cada material en una longitud de onda de 225 a 312nm. Al realizar el análisis de estas gráficas se encontró que el cuarzo es el material que menos radiación absorbe (en esta longitud de onda).

Acrílico (Grueso)	Acrílico (Medio)
	
Acrílico (Delgado)	Cuarzo
	
PVC	PET
	
Vidrio (Grueso)	Vidrio (Delgado)
	

ANEXO D

Ficha técnica medio de cultivo

PRODUCTO: PLATE COUNT AGAR- PLACA DE 90 mm

USO: El Plate Count Agar (Agar para Standard Methods), es un medio utilizado para la enumeración de bacterias aeróbicas en aguas, aguas residuales y alimentos.

PRINCIPIO: El Plate Count Agar fue desarrollado por Buchbinder, Baris y Goldstein en 1953. Esta formulación está especificada en Standard Methods para el examen del agua y las aguas residuales. En el PCA (Plate Count Agar), la Triptona y el Extracto de Levadura suministran las fuentes de nitrógeno y de vitaminas, que requieren para el crecimiento una vasta variedad de microorganismos, la glucosa actúa como fuente de energía. Se prepara según la fórmula de la USP y recomendaciones de la APHA (American Public Health Association)

La transparencia del medio y el buen tamaño de las colonias al crecer facilitan los recuentos bacterianos.

COMPOSICION POR LITRO DE MEDIO EN AGUA PURIFICADA

Hidrolizado pancreático de caseína (Triptona)	5.0 g
Extracto de levadura	2.5 g
Glucosa	1.0 g
Agar	15.0 g

pH : 7,0+/- 0,2

PRECAUCIONES: Este producto es para uso exclusivo de profesionales. No debe ser utilizado en caso de presentar contaminación microbiana, decoloración, signos de deshidratación, roturas u otros signos de deterioro. Utilizar bajo procedimientos de laboratorio, tratar siempre como material biopeligroso.

ALMACENAMIENTO Y VIDA UTIL: Una vez recibidas en el laboratorio, almacenar en lugar oscuro y seco a una temperatura de 8 °C, en su embalaje original hasta el momento de uso. Evitar la congelación y el sobrecalentamiento. Las placas deben estar a temperatura ambiente antes de ser inoculadas. No deben utilizarse con posterioridad a la fecha de caducidad. Las bolsas deben ser abiertas cuando vayan a ser utilizadas, una vez abiertas las que no se utilicen deberán mantenerse en áreas limpias y refrigeradas.

CONTROL DE CALIDAD: Estas placas han sido inoculadas con la cepas que a continuación se indican, incubadas de 32 a 36 °C en condiciones aeróbicas y examinadas transcurridas de 18 a 48 horas de la inoculación, para bacterias y

Candida, y en el caso del Aspegillus Níger 3 o 4 días de 25 a 28°C obteniéndose los siguientes crecimientos.

Cepas	Resultado de Crecimiento
Aspergillus niger ATCC 16404	Crecimiento de bueno a excelente
Bacillus subtilis ATCC 6633	Crecimiento de bueno a excelente
Candida albicans ATCC 10231	Crecimiento de bueno a excelente
Escherichia coli ATCC 25922	Crecimiento de bueno a excelente
Shigella flexneri ATCC 12022	Crecimiento de bueno a excelente
Streptococcus pyogenes ATCC 19615	Crecimiento de bueno a excelente
Staphylococcus aureus ATCC 6538	Crecimiento de bueno a excelente

CARACTERISTICAS Y LIMITACIONES DE USO: Para las siembras se deben seleccionar las diluciones a partir de la muestra (alimentos o aguas) que correspondan a crecimientos en las placas que se encuentren entre las treinta y las trescientas colonias, utilizando material estéril y refiriendo el conteo de colonias a un mililitro de muestra. Este medio, PCA, no es adecuado para aerobios exigentes y por supuesto para anaeróbicos.

ANEXO E

Siembra de las diluciones para realizar la gráfica de calibración de conteo bacteriano vs absorbancia



ANEXO F

Método de siembra por cuadrilla en placa

Es el método más fácil y el más usado para obtener cultivos axénicos. Para ello, con un asa de siembra se toma una muestra de la población mixta y a continuación se hacen cuadrillas sobre la superficie de un medio sólido preparado en una placa Petri (a las placas Petri también se les denomina simplemente placas). Conforme se van haciendo estrías en zigzag con el asa, cada vez se van depositando en la superficie del medio menos microorganismos. A continuación, se flamea el asa, se toca en la región donde se han realizado las últimas cuadrillas y se continúa la siembra con la misma técnica, en la superficie de medio sin sembrar aún. Repitiendo este proceso varias veces se logra separar células individuales. A continuación, las placas se incuban en un lugar adecuado, permitiendo que las células aisladas experimenten un número suficiente de divisiones para formar colonias visibles. Aunque cada colonia posiblemente representa un clon derivado de una sola célula, no podemos asegurarlo. Quizás, dos células quedaron depositadas tan juntas que han originado una única colonia mixta. Por tanto, para asegurarnos de que hemos obtenido un cultivo axénico, conviene repetir el procedimiento a partir de una colonia bien aislada en la primera placa. Las colonias que se desarrollen la segunda vez, serán, casi con toda seguridad, cultivos axénicos [48].

Anexo G

Tabla de intensidad lumínica en luxómetros del tercer muestreo

Tiempo (segundos)	Intensidad lumínica (lx)
0	28700
240	53000
480	58400
720	45800
960	46000
1200	54700
1440	54300
1680	31300
1920	45200
2160	44100

ANEXO H

Modelo de Weibull

El modelo de Weibull (introducido por Waloddi Weibull en 1939) es una generalización importante del modelo exponencial con dos parámetros positivos. Este es un modelo paramétrico (distribuciones estadísticas subyacentes a los datos. Por tanto, deben cumplirse algunas condiciones de validez) de análisis de supervivencia, esta medida (supervivencia) no queda limitada a los términos de vida o muerte, sino a situaciones en la que se mide el tiempo que transcurre hasta que sucede un evento de interés, como puede ser tiempo de recurrencia, tiempo que dura la eficacia de una intervención, tiempo de un aprendizaje determinado, etc. Por tanto, la supervivencia es una medida de tiempo a una respuesta, fallo, muerte, recaída o desarrollo de una determinada enfermedad o evento. [49]

Este modelo depende de tres parámetros:

- El parámetro umbral
- El parámetro de forma
- El parámetro de escala

La versatilidad de la función de Weibull radica en las diferentes formas que adopta dependiendo de los valores que tomen sus parámetros. Las implicaciones físicas, teóricas, algebraicas y gráficas son algunos de los aspectos interesantes que generan y dan lugar a diversas aplicaciones [49].

El parámetro umbral o parámetro de localización indica el origen de tiempos. El parámetro de forma se define en términos del exponente de la función potencial que determina la razón de fallo del modelo. En términos de este parámetro se definirá la monotonía de la razón de fallo. Más concretamente, la razón de fallo es monótona creciente o monótona decreciente dependiendo de que el parámetro de forma sea superior o inferior a la unidad, respectivamente [50].

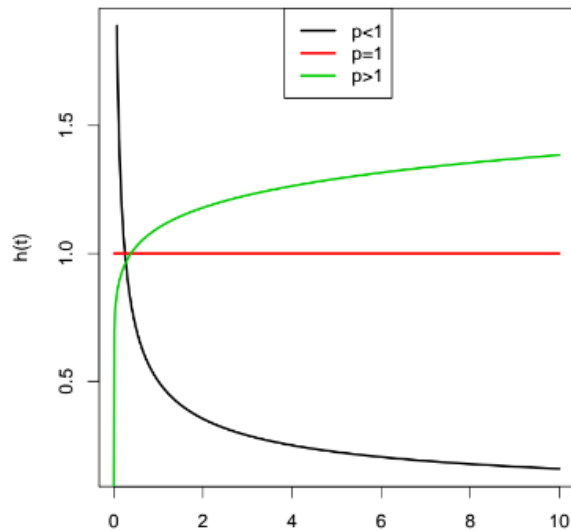
La conveniencia del modelo de Weibull para el trabajo empírico se deriva, por un lado, de esta flexibilidad y, por otro, de la simplicidad de la función de riesgo y supervivencia.

Función de densidad de probabilidad	$f(x) = \lambda \gamma x^{\gamma-1} e^{-\lambda x^\gamma}$
Función de supervivencia	$S(x) = e^{-\lambda x^\gamma}$
Función de riesgo	$\lambda(x) = \lambda \gamma x^{\gamma-1}$
Función de riesgo acumulativo	$\Lambda(x) = \lambda x^\gamma$
Media	$EX = \lambda^{-\frac{1}{\gamma}} \Gamma(1 + \frac{1}{\gamma})$
Varianza	$V(X) = \lambda^{-\frac{2}{\gamma}} (\Gamma(1 + \frac{2}{\gamma}) - \Gamma(1 + \frac{1}{\gamma})^2)$

Donde Γ denota la función Gamma con $\Gamma(k) = \int_0^\infty s^{k-1} e^{-s} ds$ ($k > 0$). Abrimos la distribución como Weibull (λ, γ). En el caso de $\gamma = 1$, se obtiene la distribución

exponencial. La función de riesgo disminuye monótonamente de ∞ en el tiempo cero a cero en el tiempo ∞ para $\gamma < 1$, constante (distribución exponencial) para $\gamma = 1$ y monótonamente aumenta de cero en el tiempo cero a ∞ en el tiempo ∞ para $\gamma > 1$.

Gráfica 20: Modelo de Weibull



Fuente: [51]

Donde p es el factor forma:

- Si $p > 1$ la curva incrementa
- Si $p = 1$ la curva es constante
- Si $p < 1$ la curva decrece

Qué se obtiene al aplicar el modelo de Weibull

Al aplicar Weibull se obtiene la distribución de fallos del conjunto de donde proviene la muestra, únicamente ajustando los parámetros del modelo al conjunto de componentes ensayados. Los parámetros característicos de la función de Weibull se pueden extraer directamente de la muestra. Esto permite conseguir un modelo estadístico que representa con mayor o menor exactitud la distribución de los fallos del conjunto o lote de donde provienen los componentes ensayados.