

**DEPURACIÓN DE AGUAS CONTAMINADAS POR ESCHERICHIA COLI Y  
SALMONELLA MEDIANTE RADIACIÓN SOLAR**

**CINDY TIBADUIZA LANDINEZ Cód. 064062015**

**LIZETH TIBADUIZA LANDINEZ Cód. 064082001**

**Bogotá**

**Universidad Libre**

**Facultad de Ingeniería**

**Departamento de Ingeniería Ambiental**

**2014**

**DEPURACIÓN DE AGUAS CONTAMINADAS POR ESCHERICHIA COLI Y  
SALMONELLA MEDIANTE RADIACIÓN SOLAR**

**CINDY TIBADUIZA LANDINEZ Cód. 064062015**

**LIZETH TIBADUIZA LANDINEZ Cód. 064082001**

**Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental**

**Director**

**M. Sc. Ing. Ricardo Vega Zafrané**

**Bogotá**

**Universidad Libre**

**Facultad de Ingeniería**

**Departamento de Ingeniería Ambiental**

**2014**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

---

**PRESIDENTE DEL JURADO**

---

**JURADO**

---

**JURADO**

Octubre, 9 de 2014

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos expresar nuestro reconocimiento y agradecimiento a todas aquellas personas que gracias a su colaboración contribuyeron a la finalización de este proyecto de grado:

En primer lugar a Dios, a nuestros padres y a nuestras familias, ya que sin su perseverancia y paciencia no habiéramos podido concluir con éxito este proyecto

Un agradecimiento especial a la Universidad Libre por permitirnos el uso de las instalaciones (laboratorios), ya que sin ellas no hubiera sido posible realizar los análisis y comprobación del método.

Al señor Francisco Bocanegra de la Secretaria Distrital de Ambiente por su aporte en la entrega de los datos de radiación solar.

Y a nuestro Director de Proyecto de Grado Ricardo Vega Zafané por su incondicional ayuda, dedicación y disponibilidad ya que fue el impulsor de este proyecto.

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCION</b> .....	<b>8</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>9</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>11</b>
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	12
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>4. MARCO REFERENCIAL</b> .....	<b>13</b>
4.1. MARCO TEÓRICO .....	13
4.1.1. DEPURACIÓN DE AGUAS CONTAMINADAS .....	13
4.1.2. PROPIEDADES DESINFECTANTES DE LA RADIACIÓN SOLAR .....	16
4.1.3. VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE DESINFECCIÓN POR EXPOSICIÓN A RADIACIÓN SOLAR .....	17
4.1.4. CINÉTICA DEL PROCESO DE DESINFECCIÓN CON RADIACIÓN SOLAR .....	19
4.2. MARCO DE ANTECEDENTES .....	21
<b>5. MARCO CONCEPTUAL</b> .....	<b>29</b>
5.1. INACTIVACIÓN DE BACTERIAS .....	29
5.2. AGENTES PATÓGENOS .....	29
5.2.1. ESCHERICHIA COLI .....	30
5.2.2. SALMONELLA .....	30
<b>6. MARCO NORMATIVO</b> .....	<b>34</b>
<b>7. DISEÑO METODOLÓGICO</b> .....	<b>34</b>
7.1. HIPÓTESIS .....	34
7.2. TIPO .....	34
7.3. METODOLOGÍA .....	34
7.3.1. DOCUMENTACIÓN PREVIA .....	34
7.3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	34
<b>8. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....	<b>37</b>
8.1. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	37
8.2. COMPORTAMIENTO CINÉTICO .....	39
8.2.1. RESISTENCIA TÉRMICA DE LOS MICROORGANISMOS .....	40

8.2.2. CINÉTICA DE INACTIVACION DE MICROORGANISMOS CON RADIACIÓN SOLAR.....	43
<b>9. CONCLUSIONES .....</b>	<b>47</b>
<b>10. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>48</b>
<b>11. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>49</b>
<b>12. ANEXOS .....</b>	<b>53</b>
12.1. FOTOGRAFIAS DISEÑO EXPERIMENTAL.....	60
12.2. FOTOGRAFIAS CINETICA DE INACTIVACIÓN .....	63

### INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resistencia térmica de los microorganismos presentes en el agua.....	18
Tabla 2: Normatividad aplicable al proyecto .....	34
Tabla 3: Diseño experimental.....	35
Tabla 4: Porcentajes de remoción E. coli y Salmonella .....	37
Tabla 5: Cinética de inactivación.....	41
Tabla 6. Datos para correlacionar la forma linealizada de las respectivas ecuaciones cinéticas.....	41
Tabla 7. Constante de inactivación de microorganismos.....	42
Tabla 8. Constante de inactivación .....	44
Tabla 9. Optimización de E. coli .....	55
Tabla 10.Optimizacion para Salmonella .....	59
Tabla 11. Anova para superficie de respuesta de E. coli .....	53
Tabla 12. Anova para superficie de respuesta Salmonella.....	56

### ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento de inactivación de microorganismos .....	20
Figura 2. Superficie de respuesta para E. Coli. ....	38

Figura 3. Superficie de respuesta para Salmonella .....	38
Figura 4. Comportamiento de Radiación Solar meses mayo y junio.....	39
Figura 5. Cinética de inactivacion de E. coli .....	42
Figura 6. Cinética de inactivacion de Salmonella .....	43
Figura 7. Ley de Chick aplicada a E. coli.....	45
Figura 8. Ley de Chick aplicada a Salmonella.....	46

## 1. INTRODUCCION.

Desde la antigüedad el agua consumida por la población mundial ha sido expuesta a varios tratamientos de descontaminación que ayudan a mejorar su potabilidad, y aunque la contaminación de las aguas va en descenso sigue siendo un riesgo inminente para la salud humana, afectando principalmente el tracto intestinal causando diarreas, vomito, fiebre entre otros (Cesar & Gonzalo, 2006).

Debido a esto se vio la necesidad de realizar un estudio exhaustivo a cerca de la depuración del agua contaminada con E. coli y Salmonella ya que estos dos son los microorganismos más comúnmente encontrados en el agua, además se encontró que las poblaciones más alejadas muchas veces no cuentan con plantas de tratamiento que garanticen una correcta higiene del agua.

Como objetivo principal se decidió implementar un tratamiento de agua que anulara el crecimiento de dichos microorganismos por medio de radiación ultravioleta solar debido a que las comunidades rurales no siempre cuentan con agua potable para consumo humano se seleccionó este método de desinfección ya que es seguro y no tiene riesgos en su manipulación, además, no produce alteraciones en su olor o sabor y no genera incidencias ni en el ambiente ni en las fuentes hídricas.

Por razones anteriormente mencionadas se implementó esta técnica de desinfección, que consistió en llenar envases de Polietileno Tereftalato (PET) transparentes con agua contaminada con los microorganismos obtenidos artesanalmente, para finalmente ser expuestas a radiación ultravioleta solar por tiempos entre 2 y 10 horas en intervalos de dos horas respectivamente, ubicadas de tal forma que les diera directamente la luz solar durante el periodo de exposición, para luego verificar por medio de su comportamiento cinético la inactivación y destrucción de su pared celular y así comprobar la eficiencia del método.



## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación del agua no es solo un problema de la actualidad, años atrás en Roma los envenenamientos que sufría la población eran ocasionados por el alto contenido de plomo en las tuberías que transportaban el agua, en la era medieval la contaminación fue en aumento provocando serios problemas de salud por aguas sucias y/o pestilentes y recientemente la contaminación del agua para el consumo humano se ha visto afectada por la presencia de contaminantes vertidos por las industrias, la agricultura y la población en general. Además, la capacidad de autodepuración del ambiente no es suficiente, causando acumulación de la contaminación ambiental en los recursos naturales, llegando a superar vastamente los límites permitidos, motivo por el cual su aptitud de uso se ve afectada (Cesar & Gonzalo, 2006).

En muchos países los mayores riesgos para la salud humana están asociados al consumo de agua con contaminación de índole microbiológica con agentes como: *Salmonella typhi*, *Vibrio cholerae*, *Guardia lamblia*, *Escherichia coli* y el virus de la hepatitis A, entre otros, aunque no se debe subestimar la importancia de la contaminación química (Organización Mundial de la Salud, 1998).

La presencia de *Salmonella* y la *Escherichia coli* se encuentra con frecuencia en los vertidos de las granjas y aguas residuales domesticas que no tienen ningún tratamiento siendo este un problema cultural, de igual manera la falta de acción del Estado ocasiona altos niveles de contaminación fecal de las aguas superficiales y que trae consigo enfermedades como: fiebre tifoidea, meningoencefalitis, amebiasis, cólera, gastroenteritis, entre otras, siendo las causas más importantes de morbilidad y mortalidad, especialmente en niños

En Colombia no se poseían evidencias de la existencia de *Escherichia coli* hasta 1997 cuando un estudio en pacientes pediátricos con Gastroenteritis aguda, segunda causa de morbi-mortalidad infantil, demostró por primera vez la presencia del patógeno con una prevalencia del 5.3%, constituyendo así un llamado de alerta en ese momento ya que la tasa de ataque fue lo suficientemente alta comparada con la de otros países (Cuesta, Mattar , & Parra, 2003)

Por otro lado la gastroenteritis también puede ser causada por la mayoría de los serotipos de *Salmonella*, más de 2.500, que se han identificado hasta hoy, los que se aíslan con mayor frecuencia en Colombia son *Salmonella Enteritidis*, *Salmonella Typhimurium* y *Salmonella Typhi* (Rincón Acero & Ramírez Rue, 2011)

En este caso se pretende evaluar un método de depuración de agua por medio de radiación solar. Para tal fin se tomará una muestra de agua destilada con solución buffer de ácido acético y fosfatos, de la cual se prepararán muestras con diferente grado de contaminación para luego ser expuestas a la radiación solar (RS) de acuerdo con las condiciones planteadas en el diseño experimental. Las muestras finalmente serán analizadas después del tratamiento para evaluar el avance de la desinfección.

### 3. JUSTIFICACIÓN.

La contaminación de las fuentes hídricas generada por vertimientos asociados a la industria, a la agricultura y a la población en general, ocasionan problemas que afectan la salud de la comunidad disminuyendo así su calidad de vida; por otro lado, esta contaminación ocasiona pérdida de biodiversidad y de la cantidad de agua potable que hay en el país, con la disponibilidad de agua superficial por kilómetro cuadrado en 2.132 km<sup>2</sup>/año (Ramírez, 2011).

Ahora bien, como la calidad del agua para consumo humano, agrícola e industrial depende en gran medida de los tratamientos aplicados para remover los contaminantes que se encuentren presentes en ella, esto obliga a los proveedores a hacer grandes esfuerzos para poder mejorar la protección de la salud de los consumidores. En este contexto es clara la necesidad de generar nuevas estrategias que den solución a la contaminación del agua.

Debido a que la *Salmonella* y la *Escherichia coli* se utilizan como indicadores de contaminación fecal, y es sabido que mientras mayor sea su presencia en el agua, mayor será la probabilidad de estar frente a una contaminación reciente, se resolvió hacer la determinación de la capacidad de depuración de los RS con estas dos especies.

Finalmente la importancia de conocer la concentración de las especies consideradas en el tratamiento de agua que se pretende realizar, radica en la posibilidad de implementar un método económico y de fácil aplicación por cualquier campesino, para que logre su eliminación y de esta manera controlar enfermedades de origen hídrico.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar la eficiencia de la desinfección por radiación solar para *Escherichia coli* y *Salmonella* presentes en solución acuosa.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar cuantitativamente la inactivación de *E. coli* y *Salmonella* presentes en solución acuosa, a distintos valores de pH y tiempos de exposición de las bacterias a la radiación.
- Analizar el comportamiento cinético del proceso de inactivación mediante exposición a radiación solar.

## 4. MARCO REFERENCIAL

### 4.1. MARCO TEÓRICO

#### 4.1.1. DEPURACIÓN DE AGUAS CONTAMINADAS

Se puede definir la depuración de aguas como un conjunto de operaciones encaminadas a reducir los agentes contaminantes presentes en el agua. Para el tratamiento de aguas existen varios métodos como los son:

- Métodos físicos: en este predomina la aplicación de fuerzas, estos métodos son conocidos como unidades de operación física. Estos métodos evolucionaron por observaciones directas del hombre en la naturaleza, fueron los primeros en ser usados para el tratamiento de aguas residuales. Estos métodos son típicamente tamizado, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, filtración y transferencia de gas (<http://ambientaling.wordpress.com/>, s.f.)
- Métodos químicos son métodos de tratamiento en los cuales la remoción o conversión de contaminantes se lleva a cabo mediante la adición de químicos o mediante otras operaciones químicas, son conocidos como unidades de proceso químicos. Los ejemplos más comunes son precipitación, absorción y desinfección, también se encuentran la oxidación con ácido perclórico y oxidación con peróxido de hidrogeno, entre otros (<http://ambientaling.wordpress.com/>, s.f.)
- Métodos biológicos son métodos de tratamiento en los cuales la remoción de contaminantes se lleva a cabo mediante actividad biológica, son conocidos como unidades de procesos biológicos. El tratamiento biológico se usa principalmente para remover las sustancias orgánicas biodegradables (coloidales o disueltas) en el agua residual (básicamente las sustancias son convertidas en gases que pueden escapar a la atmósfera y en tejido celular biológico que puede ser removido mediante sedimentación). En este métodos se puede usar reactores de lodos activos, reactores UASB (del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket) también conocido como RAFA (reactor anaerobio de flujo ascendente), reactores de bio-discos, lagunas de oxidación, estabilización o desecho, entre otros. (<http://ambientaling.wordpress.com/>, s.f.)

- Métodos mixtos: son métodos de tratamiento los cuales es una combinación del método físico y químico como la coagulación floculación sedimentación y filtración. (<http://ambientaling.wordpress.com/>, s.f.)

Cada uno de estos métodos requiere de operaciones posteriores tales como la filtración, sedimentación, espesamiento, secado, entre otras.

Un importante parámetro que debe ser controlado en las aguas residuales es la contaminación microbiológica, para la cual el tratamiento que se realiza es la desinfección, este método se refiere a la inactivación de los microorganismos especialmente patógenos mediante la adición de un agente desinfectante, típicamente hipoclorito de sodio. La razón por la cual se debe realizar la desinfección es porque muchos de los microorganismos presentes en las aguas residuales son causantes de enfermedades. Aunque la desinfección es un método importante para inactivar los microorganismos se requiere de pre tratamientos para disminuir la carga sólido en el agua que se desee tratar.

#### **4.1.2. DESINFECCIÓN**

La desinfección tiene como objetivo mejorar la calidad del agua desde el punto de vista microbiológico y asegurar que sea inocua para la salud del consumidor reduciendo el riesgo de sufrir de enfermedades gastrointestinales. En los países en vía de desarrollo normalmente no hay sistemas de tratamiento de aguas para la población rural ocasionando la muerte de la población vulnerable como los niños y adultos mayores a causa de agentes patógenos existentes en el agua (Barrenechea Martel & Vargas)

La desinfección del agua significa la inactivación o eliminación de los microorganismos patógenos afectando su ciclo reproductivo. Los desinfectantes no solo eliminan los microorganismos si no que deben además tener efecto residual, lo que significa que den lugar a la formación de agentes activos en el agua después de la desinfección para prevenir el crecimiento (Aurioles Moreno, Alvares Morales , & Castañeda Gonzalez, 2008).

Según estudios relacionados con la desinfección solar, (SODIS por su sigla en inglés, Solar Disinfection) sus inicios como técnica de aseguramiento de calidad microbiológica del agua, se remontan a la década de los 70, sin embargo, estos estudios solo vinieron a tener forma en 1985. Inicialmente fueron financiados por agencias internacionales como la UNICEF e Integrated Rural Energy Sistem Association (INRESA); el estudio pionero lo desarrolló el profesor Accra en la

Universidad de Líbano en el que descubrió que al exponer agua a la radiación solar, el número de microorganismos presente disminuye notablemente. A partir de entonces, este método se ha efectuado en distintos lugares alrededor del mundo, principalmente en los países en vías de desarrollo.

Por otro lado, en los años 90s, el Instituto Federal Suizo de Ciencia y Tecnología Acuática (EAWAG), en colaboración con el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (CASA) de la Universidad Mayor San Simón de Cochabamba, Bolivia, implementó proyectos demostrativos de la tecnología SODIS, para valorar el grado de aceptación de la misma por las familias.

#### **4.1.3. MÉTODOS DE DESINFECCIÓN**

La desinfección de agua puede llevarse a cabo por dos diferentes procesos

- Agentes químicos: los agentes químicos utilizados para la desinfección incluyen cloro y sus componentes, bromo, yodo, ozono, fenol, alcoholes, agua oxigenada o peróxido de hidrogeno entre otros. Los desinfectantes químicos más usados son los oxidantes de los cuales el cloro es el más usado universalmente porque destruye la mayoría de microorganismos (bacterias, virus, protozoos) que ponen en riesgo la salud humana. Una desventaja que tiene este método es que después del proceso quedan residuos siendo estos tóxicos hasta en las concentración químicas más bajas pueden ser letales para la vida marina.

Recientemente el ozono ha comenzado a acaparar la atención como método para la desinfección de agua, ya que el ozono es un oxidante y agente germicida que destruye directamente la pared celular de los microorganismos, aunque esto depende de la susceptibilidad que poseen los microorganismos a ser tratados, del tiempo de contacto y de la concentración de ozono que se aplique al agua. Una de las ventajas que posee el método de desinfección con ozono es que aumenta la cantidad de oxígeno en el agua

- Agentes físicos: Los desinfectantes físicos que se pueden emplear son la luz y el calor

La radiación ultravioleta ha sido empleada como medio de desinfección desde 1901 fecha en la cual se inventa la lámpara de mercurio, este método es letal para los microorganismos en especial las bacterias y virus ya que este tipo de radiación daña irreversiblemente la estructura celular ya que descompone foto

químicamente el ácido ribonucleico RNA y desoxirribonucleico ADN, aunque el tipo de microorganismo también interfiere en la desinfección, ya que algunos poseen una capa protectora que impide que la radiación ultravioleta

En cuanto a la desinfección por calor es un método que se utiliza desde la antigüedad para inactivar los microorganismos. La acción del calor por un tiempo prolongado y a la temperatura de ebullición causa la muerte de todo tipo de microorganismos, pero por su alto costo requerido para hacer hervir el agua en la industria es poco utilizada.

#### **4.1.4. PROPIEDADES DESINFECTANTES DE LA RADIACIÓN SOLAR**

La primera vez que se usó el término luz ultravioleta fue en 1801 por Johannes Ritter quien realizaba investigaciones sobre los efectos de la luz sobre el cloruro de plata, ocurriéndosele hacer pasar el haz luminoso a través de un prisma y observando si existía alguna diferencia en la acción de las distintas frecuencias. De esta forma comprobó que la parte invisible del espectro situada más allá del violeta era la más activa, recibiendo el nombre de “ultravioleta” (Spitzer, 2006). Se han definido cuatro regiones del espectro UV- vacío UV entre 100 y 200 nm, UV-C entre 100 y 280nm, UV-B entre 280 y 315nm, y UV-A entre 315 y 400nm (Meulemans, 1986).

El proceso de desinfección solar es un proceso térmico que consiste en elevar la temperatura del agua por un tiempo suficiente de exposición a radiación solar para ser absorbida por contenedores acondicionados como pueden ser: calentadores solares, cocinas y concentradores solares, destiladores solares y botellas y/o recipientes. (Estos contenedores pueden ser de diversos materiales conductores del calor), ya que la luz ultravioleta al tener un efecto letal en los microorganismos interactúa directamente con el ácido desoxirribonucleico ADN, ácido ribonucleico ARN, y las enzimas de la celular cambiando su estructura molecular produciendo su muerte.

A pesar de lo interesante del método y de sus escasos requerimientos, la desinfección solar también conocida como SODIS no ha alcanzado popularidad extendida. La razón es que hay demasiadas variables que condicionan su eficiencia como son: latitud y altitud geográfica, la estación, el número de horas de exposición, la hora, la nubosidad, la temperatura; el tipo, el volumen y el material de los envases que contienen el agua; la turbiedad de agua y el color; son, entre otros, los parámetros que podrían interferir en una desinfección perfecta.



La Organización Mundial de la Salud considera a la desinfección solar puede ser una opción válida para lugares en donde no se cuenta con otro medio para desinfectar el agua puede mejorar la calidad microbiológica del agua para consumo y también para pocas cantidades.

#### **4.1.5. VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE DESINFECCIÓN POR EXPOSICIÓN A RADIACIÓN SOLAR.**

Una de las principales variables que afectan el proceso de desinfección es el tipo de microorganismos debido a esto los desinfectantes pueden matar muchos microorganismos patógenos como virus y bacterias de manera eficaz, debido a que la E. coli es uno de los microorganismos más fuertes al contacto con los desinfectantes se utiliza como indicador de contaminación, aunque la ausencia de este no significa que el agua sea apta para consumo humano ya que hay más microorganismos patógenos para la salud humana.

En cuanto a la edad de las bacterias existen bacterias adultas y jóvenes, estas últimas son más fáciles de matar, debido a que las bacterias desarrollan una capa protectora de polisacáridos sobre su pared celular, lo que las hace más resistentes al proceso de desinfección.

*“Por ejemplo con una dosis de 2,0 mg/L de cloro el tiempo de contacto requerido para desactivar la bacteria es de diez días, sin embargo cuando es adulta puede necesitarse del orden de 30 minutos. Para las bacterias de la misma especie y de edad de un día, un minuto puede ser suficiente como tiempo de contacto. Las esporas de bacterias pueden ser muy resistentes y de hecho las mayoría de los desinfectantes no son efectivos para la eliminación de las esporas” (Water Treatment Solutions Lenntech)*

El rango germicida se encuentra entre 240 nm y 280 nm (nanómetros), obteniéndose la máxima eficiencia desinfectante cerca de los 260 nm tratándose de agua con patógenos nocivos para el consumo humano ya que estos no se adaptan a las condiciones ambientales, siendo sensibles a la luz solar, interactuando con su ácido desoxirribonucleico (ADN), alterando su estructura molecular, lo cual incapacita la reproducción de los microorganismos, ocasionando su inactivación y causándoles la muerte.

En cuanto a la temperatura, se puede decir que ésta influye, en la medida que afecta las reacciones, aumentando su velocidad o puede llegar a provocar la volatilización o inactivación del agente desinfectante. (Water Treatment Solutions Lenntech)

Esta radiación tampoco la puede ver el ojo humano, pero podemos sentir el calor producido por la luz con una longitud de onda superior a 700 nm. La radiación infrarroja absorbida por el agua es responsable de su calentamiento.

Los microorganismos son sensibles al calor. La tabla 1 presenta la temperatura y el tiempo de exposición necesarios para eliminar microorganismos. Puede verse que el agua no tiene que hervir para matar el 99.9% de los microorganismos y el calentamiento del agua a 50- 60°C durante una hora tiene el mismo efecto.

**Tabla 1: Resistencia térmica de los microorganismos presentes en el agua**

MICROORGANISMOS	TEMPERATURA (°C) PARA DESINFECCION DEL 100%		
	1 MIN	6 MIN	60 MIN
Coliformes fecales	-	-	-
Salmonella	-	62	58
Shigela	-	61	54
Vibrio Cholerae	-	-	45
Rotavirus	-	-	63 por 30 min
Enterovirus	-	-	62

**Fuente: EAWAG/SANDEC (2002)**

La energía de la radiación ultravioleta es absorbida por el agua, pero en mucho mayor grado es absorbida por los sólidos en suspensión lo cual reduce la penetración de la radiación en el agua impidiendo que los microorganismos sean irradiados por lo que la desinfección del agua se ve reducida por la turbiedad.

Si la turbiedad del agua es mayor a 30 unidades nefelométricas de turbidez (UNT), es necesario realizar un pre tratamiento al agua antes de exponerla a la luz solar. Los sólidos y partículas más grandes se pueden eliminar almacenando el agua cruda durante un día y dejando que las partículas se asienten en el fondo. Se puede separar la materia sólida mediante filtración, usando una capa de arena o un paño. También se puede reducir la turbiedad mediante semillas trituradas de Moringa oleífera.

A menor distancia del agua respecto al punto de emisión de los rayos, mayor será la intensidad de los mismos y por tanto la desinfección será más eficiente. Con

respecto a esta condición, existe una regla general que dice que no debe haber más de 7,5 cm de profundidad de agua para asegurar que cada porción de la misma sea alcanzada por los rayos adecuadamente.

La eficacia de SODIS depende de la cantidad de luz solar disponible; sin embargo, la radiación solar se distribuye de manera irregular y su intensidad varía de una ubicación geográfica a otra, dependiendo de la latitud, la estación y la hora del día

Las regiones más favorables para aplicar SODIS se ubican entre las latitudes 15°N y 35°N (así como 15°S y 35°S). Estas regiones semiáridas se caracterizan por la mayor cantidad de radiación solar. Más del 90% de la luz solar toca la tierra como radiación directa, debido a la limitada cobertura nubosa y la poca precipitación

Es importante señalar que la mayoría de países en desarrollo están ubicados entre la latitud 35°N y 35°S. Por lo tanto, pueden basarse en la radiación solar como fuente de energía para la desinfección solar del agua para consumo humano (Meierhofer & Wegelin)

Como cualquier otro desinfectante, el tiempo de exposición es vital para asegurar un buen desempeño.

Finalmente se recomienda el uso de recipientes de PET ya que estos contienen menos aditivos como estabilizadores UV que son usados para incrementar la estabilidad del recipiente y proteger a los recipientes y sus contenidos de la oxidación y la radiación.

#### **4.1.6. CINÉTICA DEL PROCESO DE DESINFECCIÓN CON RADIACIÓN SOLAR.**

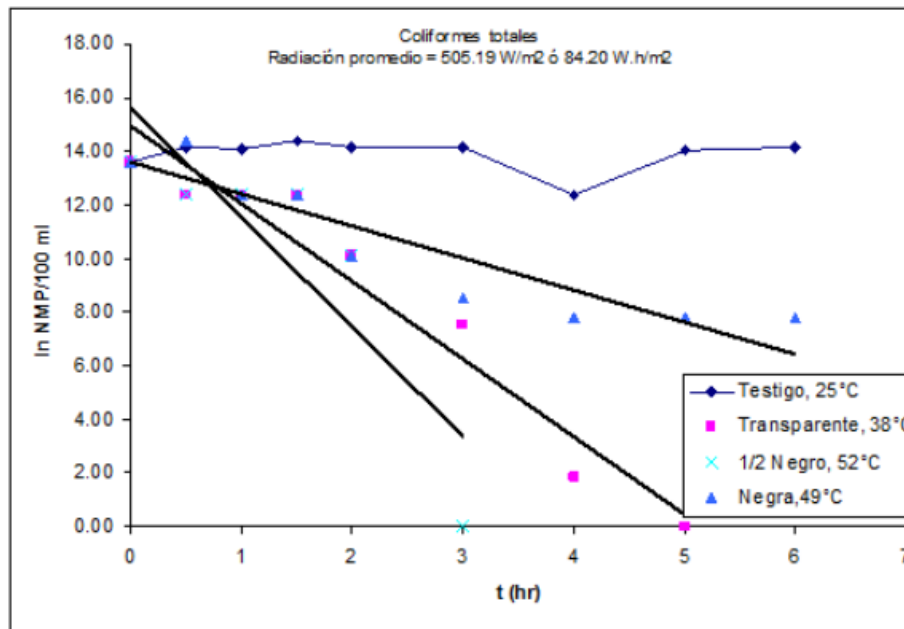
La ley de Chick establece que la velocidad de destrucción bacteriana es directamente proporcional al número de microorganismos que sobreviven en un tiempo determinado. Como principio para la cinética de inactivación de microorganismos por radiación solar se sigue la ley de Chick.

$$N = N_0 e^{-kIT_c}$$

En Donde  $N_0$  es la concentración inicial de microbios previa a la aplicación de UV, “N” es el número de microbios remanente después de la exposición a la luz UV, “I” es

la intensidad UV por unidad de superficie ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ), "TC" es el tiempo de exposición (seg), y "k" es la constante cinética de inactivación ( $\text{seg}^{-1}$ ) (J. Suarez), de esta forma si se incrementa la cantidad de dosis de radiación solar así mismo se reduce la población microbiana.

**Figura 1. Comportamiento de inactivación de microorganismos**



**Fuente:** Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Esta grafica representa la efectividad de la inactivación de los microorganismos en donde es posible eliminar niveles de  $10^4$  de E. Coli/100 ml y la misma cantidad para Salmonella (Agua, 2012).

## 4.2. MARCO DE ANTECEDENTES

Los antecedentes de este proyecto se enfocan en los teóricos externos siendo estas investigaciones internacionales desarrolladas relacionadas con el tema y en teóricos institucionales basándose estos últimos en un estudio similar al tema a trabajar.

- DISEÑO DE UN COLECTOR SOLAR PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RESIDUOS SÓLIDOS

**Autor:** Pinto Maturana, Wilmin, Universidad Libre, 2007

Este trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Ambiental, se basó en buscar una alternativa de manejo para sustancias contaminantes proponiendo un diseño de un colector solar que describe su comportamiento y su funcionalidad frente al tratamiento de lixiviados de residuos sólidos por medio del empleo de la radiación solar y su transformación en calor. El autor considera la posibilidad de una previa construcción del colector ya que por ser un diseño elaborado pensando en los costos en los que se incurren al implementar un sistema de tratamiento foto térmica, se considera que esta alternativa puede llegar a ser viable para poblaciones con bajos recursos económicos.

- AVALIAÇÃO DA DESINFECÇÃO SOLAR NA REGIÃO CENTRO -OESTE DO BRASIL USANDO DIFERENTES ORGANISMOS INDICADORES DE CONTAMINAÇÃO.  
(EVALUACIÓN DE DESINFECCIÓN SOLAR EN LA REGIÓN CENTRO OESTE DE BRASIL USANDO DIFERENTES ORGANISMOS INDICADORES DE CONTAMINACIÓN)

**Autores:** Cristina Celia Silveira Brandão, Patrícia de Campos Gomes Monteiro, Barbara Medeiros Fonseca, Carolina Arantes, XXI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Eng. Sanit. Ambient. vol.14 no.3 Rio de Janeiro July/Sept. 2009

Este estudio presenta los resultados sobre la utilización de radiación solar siendo el sol una fuente natural y universalmente disponible como agente desinfectante dentro de las características climáticas presentes en Brasil realizándolo en la región Centro-Oeste. Se desarrolló considerando diferentes calidades de agua (turbiedad y color) e indicadores microbiológicos con resistencias distintas para evaluar las condiciones

como el tiempo de exposición necesario para la inactivación de agentes patógenos, espesor de la lámina de agua, implementando esta alternativa para la zonas rurales

La metodología utilizada en este trabajo consistió en la exposición a la radiación solar, en los tiempos señalados con muestras de 3 a 6 litros de agua con características específicas.

La desinfección solar fue capaz de promover la inactivación completa de cantidades significativas de *E. coli* (105 NMP/100 ml) y coliformes totales (103 NMP/100 ml) en recipientes de lámina de agua de 5 cm, con tiempos de exposición al sol de tres horas, incluso cuando el día estaba parcialmente nublado.

Por otra parte, la desinfección solar no demostró ser eficaz para la inactivación de *E. coli* cuando la profundidad del agua en el recipiente adoptado es muy alta ya que influye de manera significativa en el tiempo necesario para la inactivación completa de organismos patógenos.

- **DESINFECÇÃO SOLAR: PROPOSTA DE METODOLOGIA DE ESTUDO DE VIABILIDADE E DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS BÁSICOS**

**Autores:** Marco Antonio Almeida De Souza, Patricia Campos Gómez, Cristina Celia Silveira, Ricardo Silveira Bernandes, *Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental; AIDIS 1999*

Fue propuesta una metodología de estudio de la viabilidad y determinación de los parámetros básicos para la desinfección solar y la determinación de los parámetros de desinfección solar básica. La metodología propuesta en este trabajo para el estudio de la desinfección solar se compone de tres etapas distintas, estratégicamente propuestas con el objetivo de evaluar los parámetros que viabilizan el proceso de la desinfección solar de agua.

El primer paso consiste en estudios preliminares para demostrar la viabilidad de proponer la metodología. El segundo paso consiste en realizar pruebas para demostrar los resultados de la experiencia obtenida en el paso anterior. La tercera etapa consiste en experimentos en un reactor de desinfección solar en flujo continuo. Todo el trabajo de investigación se lleva a cabo en un área libre de sombra se encuentra Campus de la Universidad de Brasilia, ubicada en el Plano Piloto Ala Norte, Distrito Federal.

Los resultados hasta la fecha indican valores satisfactorios para los parámetros estudiados (turbidez influente, profundidad, densidad la contaminación y el tiempo de exposición). Por lo tanto, es posible demostrar que la desinfección con energía solar

es una alternativa para las zonas con bajos recursos y que tienen escasas de agua potable.

- DESINFECCIÓN SOLAR, UNA ALTERNATIVA PARA PEQUEÑAS COMUNIDADES RURALES

**Autor:** Anónimo, Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua

Este artículo muestra los resultados de estudios sobre desinfección solar de agua de consumo humano usando un concentrador solar de paredes planas y botellas de plástico transparentes, validado en laboratorio y comunidades rurales de los estados de Oaxaca y Chiapas.

La metodología propuesta por los autores sigue los diferentes pasos primera etapa validación en laboratorio de la eficiencia de la desinfección solar en la remoción de contaminantes microbiológicos bajo diferentes condiciones de radiación solar, turbiedad del agua, tiempos de exposición, tipo de recipiente contenedor de agua y el uso de un concentrador solar; la segunda etapa fue evaluar la factibilidad técnica y social de la desinfección solar usando el concentrador en comunidades rurales de Oaxaca y Chiapas y establecer sus condiciones de uso y aceptación; como consecuencia de los estudios anteriores, fue necesario buscar nuevos materiales reflejantes de uso común y fácil adquisición (papel aluminio o envolturas de papas fritas) para mejorar la eficiencia del concentrador prototipo.

- ESTUDIO DE UN COLECTOR SOLAR DE PAREDES PLANAS PARA DESINFECTAR AGUA

**Autor:** Arturo González Herrera, Josefina Vergara Sánchez, Alejandra Martin Domínguez, Claudio Alejandro Estrada Gasca, Federación Mexicana De Ingeniería Sanitaria Y Ciencias Ambientales, 2002

El presente artículo muestra los resultados de un estudio de materiales que reflejen la luz para mejorar el rendimiento de un concentrador solar de paredes planas para desinfectar agua de consumo humano. En el estudio se probaron nuevos materiales de uso común como plásticos metalizados, láminas de aluminio, así como papel aluminio y cinta de aluminio, dando por resultado que el mejor material considerando su capacidad de reflejar la luz, durabilidad y eficiencia para remoción de coliformes totales es la cinta de aluminio.

La metodología empleada propone cuatro etapas, la primera etapa consiste en la búsqueda de materiales reflejantes de uso común y fácil adquisición; la segunda etapa determina la capacidad de reflejar la radiación solar (longitud de onda en el rango 200 a 700 nm) para preseleccionar los mejores materiales y construir los colectores; la tercera etapa determina la radiación útil (radiación incidente, fracción que entra a la botella considerando las características geométricas del concentrador) y la última etapa mide la eficiencia de la desinfección solar en la remoción de bacterias coliformes.

- EFECTO DEL COLOR Y LA TURBIEDAD EN LA ELIMINACIÓN DE COLIFORMES FECALES AL APLICAR EL MÉTODO DE DESINFECCIÓN SOLAR EN AGUA CRUDA PROVENIENTE DE LOS VERTEDEROS DE ACATÁN, TEOCINTE 18" Y CANALITOS DE LA PLANTA POTABILIZADORA SANTA LUISA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

**Autor:** Mildred Carmina López Orizabal, Escuela regional de ingeniería sanitaria y recursos hidráulicos 2002

El estudio consistió en evaluar las condiciones iniciales y finales de seis muestras de agua cruda provenientes de los vertederos de Acatán, Teocinte 18" y Canalitos que abastecen la Planta potabilizadora Santa Luisa de la ciudad de Guatemala.

Los parámetros medidos fueron temperatura, color, turbiedad y coliformes fecales, que además fueron monitoreados cada dos horas de exposición a la luz solar para evaluar la remoción de coliformes fecales conforme al incremento o disminución de la intensidad de radiación solar en los días que se realizó el muestreo que corresponden a la época seca en la ciudad de Guatemala.

Del análisis e interpretación de los resultados obtenidos se infirió que las condiciones de radiación solar y temperatura predominantes en la ciudad de Guatemala en época seca fueron efectivas para la remoción del 97% al 100% de coliformes fecales en agua cruda de turbiedad menor de 30 UTN y un rango de color de 9 a 158 UC y que la eficiencia de la desinfección solar se reduce después de las 2 pm, porque disminuyen la intensidad de la radiación solar y la temperatura.

Para concretar el último de los objetivos específicos del estudio, se realizó la comparación entre los porcentajes de remoción de coliformes fecales evaluados con el método de membranas de filtración y con tubos de fermentación por diluciones múltiples, obteniéndose que los porcentajes de remoción por el método de tubos de fermentación por diluciones múltiples son mayores en los seis días muestreados. Por



el método de membranas de filtración cinco de las seis muestras analizadas cumplen con la Norma técnica Guatemalteca COGUANOR NTC 29:001 (Norma Técnica Guatemalteca, 2010) y por el método de tubos de fermentación por diluciones múltiples sólo cuatro, lo que conllevó a la recomendación de evaluar los resultados de las muestras desinfectadas con SODIS por ambos métodos y compararlos con la Norma COGUANOR NGO 29:001 para agua potable.

- EFFECT OF THE RADIATION INTENSITY, WATER TURBIDITY AND EXPOSURE TIME ON THE SURVIVAL OF *CRYPTOSPORIDIUM* DURING SIMULATED SOLAR DISINFECTION OF DRINKING WATER

**Autor:** Hipólito Gómez, María Fontán, Kevin G. MacGuigan, Elvira Ares,  
*Revista Acta trópica 2009*

En este estudio la técnica utilizada es la de desinfección solar siendo esta un proceso eficaz para inactivar microorganismos patógenos en el agua, enfocándose en el parásito *Cryptosporidium parvum* encontrándose este a menudo en aguas superficiales asociándose a brotes *criptosporidiosos* siendo esta una enfermedad intestinal que produce síntomas como diarrea, dolores abdominales, vómitos, fiebre, dolor de cabeza y pérdida de apetito.

Para poder determinar los efectos que conlleva combinar intensidad de la radiación solar, la turbiedad del agua y el tiempo de exposición se utilizó un modelo matemático multifactorial para demostrar la efectividad y la ineffectividad del método en procedimientos simulados con una temperatura constante de 30<sup>0</sup>C para inactivar los *ooquistes* de *C. parvum*; La evaluación de los efectos combinados de la intensidad de la radiación solar, la turbidez del agua y el tiempo de exposición en la inactivación de *C. ooquistes parvum* en el agua potable durante los procedimientos simulados de SODIS mostró que los tres parámetros radiación, tiempo de exposición y la turbidez son factores estadísticamente significativos que afectan al potencial de viabilidad infectividad de este protozoo.

En la preparación de las muestras se adicionó suelo al agua destilada variando los niveles de turbiedad, el suelo se analizó en el departamento de edafología de la facultad de Farmacia de la Universidad de Santiago de Compostela (España); para simular la radiación solar se utilizó una lámpara de arco de xenón 1000W, las radiaciones se ajustaron aproximadamente a las intensidades de radiación solar de las zonas ecuatoriales que corresponde a nublado, el sol brumoso y luz solar intensa. Teniendo esto se añadieron suspensiones de *ooquistes* de *C. parvum* en contenedores de polietileno transparente una muestra de 30 ml agitándose y se

expusieron a la radiación solar a diferentes tiempos con una temperatura constante. De todos los parámetros evaluados, el coeficiente más grande, con un signo negativo, corresponde a la intensidad de la radiación.

Los tres factores tuvieron efectos significativos siendo el resultado que el parámetro que más influjo fue la intensidad de la radiación de  $600\text{W}/\text{m}^2$  y el tiempo de exposición de 8 a 12 horas

- THE EFFICACY OF SIMULATED SOLAR DISINFECTION (SODIS) AGAINST ASCARIS, GIARDIA, ACANTHAMOEBA, NAEGLERIA, ENTAMOEBA AND CRYPTOSPORIDIUM

**Autor:** Wayne Heaselgrave, Simon Kilvington

La actividad antimicrobiana de la desinfección solar simulada (SODIS) en presencia y ausencia de riboflavina contra diversos organismos de protozoos y helmintos se investigó en este estudio. Este estudio se llevó a cabo en 12 pocillos de microtitulación con una suspensión de 250 M de riboflavina, exponiéndose a radiación solar, el simulador solar contiene una lámpara de xenón de 1,5 kW encerrado en el aparato de prueba y tiene una cámara de pruebas con termostato para mantener una temperatura constante de las muestras de prueba a lo largo del experimento las muestras fueron expuestas a una irradiación de  $550\text{W}/\text{m}^2$ .

Las muestras fueron tomadas en diferentes tiempos y la viabilidad del método para inactivar los microorganismos fue con una radiación de  $550\text{W}/\text{m}^2$  y un tiempo de exposición de máximo 6 horas.

Al adicionar riboflavina a las muestras se demostró que aumenta la efectividad de la inactivación con los quistes de *A. castellanii*, sin embargo para los quistes de *Cryptosporidium* y óvulos *Ascaris* la efectividad de inactivación se redujo significativamente. Sin embargo, los óvulos *Áscaris* se continúan desarrollando después de la exposición a radiación solar.

- EFFICIENCY IN THE DISINFECTION OF WATER FOR HUMAN CONSUMPTION IN RURAL COMMUNITIES USING SOLAR RADIATION

**Autor:** Alejandra Martín Domínguez, Ma. Teresa Alarcón Herrera, Ignacio R. Martín Domínguez, Arturo González Herrera, Revista Solar Energy, 2005

En este estudio se evalúa la eficiencia de la desinfección solar para la inactivación de coliformes totales y *E. coli* en el agua potable poniendo a prueba comunidades rurales del municipio de Guachochi en la Sierra Tarahumara, Estado de Chihuahua México, esta zona se escogió porque carece de sistemas de abastecimiento de agua potable.

Las pruebas realizadas consistieron en estudiar el efectos de desinfección del agua por la exposición directa a radiación solar con y sin concentradores solares los cuales son cubiertos con diferentes materiales que reflejen la luz como los son espejos, cinta de aluminio autoadhesiva que son fácilmente encontrados, también se utilizaron botellas de plásticos que se pintaron las mitad de negro y otras completamente de negro, después de variar el tiempo de concentrador solar y el tipo de botella el experimento dio como resultado que las inactivación de los *coliformes totales* y la *E. coli* es mayor cuando se utilizan concentradores solares y que la botella este pintada reduciendo el tiempo de exposición en 2 horas cuando era de 6 horas cuando no se usaban colectores y la botella estaba sin pintura

- EFFICIENCY OF POLYETHYLENE TEREPHTALATE (PET) REACTORS IN SOLAR WATER DISINFECTION FOR USE IN SOUTHEASTERN BRAZIL

**Autor:** Andrea Rodrigues Marques, Fatima de Cassia Oliveira Gomes, Marcos Paulo Pontes Fonseca, Julia Soares Parreira, Veronica Pinheiro Santos. *Revista solar Energy 2013*

El objetivo de este estudio era el investigar sobre la eficiencia de los concentradores solares de materiales como el cartón y cubierto con papel de aluminio y los reactores de PET transparentes y de dorso negro para comparar la de estos reactores con los que se utilizan en techos de asbesto

La desinfección de las muestras de agua del río de las Viejas de la zona del sureste de Brasil se evaluó en botellas PET pintadas la mitad de negro. Los análisis microbiológicos del agua e cuanto a coliformes totales y *E. coli* se analizaron mediante el método de tubos múltiples antes y después de la desinfección solar las muestras de agua se dejaron expuestas por 3 horas a la radiación solar, en los días soleados se logró una inactivación de *E. coli* de un 99% con una temperatura de

50°C, sin embargo los coliformes totales en solo 3 horas de exposición no logra la inactivación en las mismas condiciones meteorológicas

- INVESTIGATING THE EFFICIENCY OF SOLAR ENERGY SYSTEM FOR DRINKING WATER DISINFECTION

**Autor:** Muna Hindiyeh, Ashraf Ali, Revista Desalination 2010

El objetivo de este estudio fue evaluar la eficacia de las láminas de aluminio en un concentrador solar como medio de esterilización en la inactivación de bacterias Heterotróficas totales (THBC) obteniendo las muestras de pozos locales en el Norte de Jordania

Se realizaron exámenes microbiológicos para determinar la cantidad de THBC, Coliformes totales (TC) y *Pseudomonas aeruginosa* basándose en las normas estadounidenses para agua potable, las muestras se recogen tres veces durante un periodo determinado de Junio a Noviembre 2003 de 16 pozos en diferentes regiones encontrándose la mayoría cerca de pozos de alcantarillado, se recogió un volumen de agua de 7,5 L en bolsas de plástico estériles a las cuales se les realizó análisis microbiológico antes y después de la exposición a la radiación solar.

Los resultados muestran que es posible conseguir una completa descontaminación de muestras de agua sin ningún peligro de recrecimiento bacteriano. Si el agua es desinfectada se puede almacenar durante más de siete días sin que se siga contaminando. Esto implica que la desinfección solar será una vía prometedora para mejorar la calidad del agua en los países en desarrollo con un bajo costo y energía limpia.

## **5. MARCO CONCEPTUAL.**

### **5.1. INACTIVACIÓN DE BACTERIAS.**

Para la inactivación de las bacterias es necesario tener en cuenta que se tomarán en consideración *Salmonella* y *E. coli*, ya que estas son indicadores que demuestran contaminación reciente del agua

En cuanto a la inactivación de la salmonella, esta se inactiva cuando está a 37 °C, con temperaturas inferiores, sigue multiplicándose hasta los 5°C, aunque el crecimiento se retarda enormemente por debajo de 10 °C. La temperatura máxima en la que se detecta desarrollo es entre 45°C y 47 °C. En cuanto al pH, la salmonella muestra un crecimiento máximo entre valores de 6.5 y 7.5, viéndose éste detenido cuando el pH se sitúa por debajo de 4.5 o supera el valor de 9.0 es por esta razón que la salmonella se reproduce mejor en el intestino de humanos y animales ya que este es un medio que posee las condiciones ambientales propicias para su proliferación.

El principal tratamiento de inactivación para la bacteria *E. coli* es el tratamiento térmico a partir de 65°C, ya que con una temperatura de congelación a las bacterias solo se les detiene el crecimiento pero no se inactivan. (Fundacion Vasca para la Seguridad Agroalimentaria, 2013)

### **5.2. AGENTES PATÓGENOS**

La mayoría de las bacterias entéricas se encuentran alojadas en el agua de consumo, estas colonizan el tracto gastrointestinal humano causando enfermedades y son eliminadas a través de las deposiciones, afectando principalmente a la población infantil.

Los agentes patógenos cambian en relación de la densidad de población, “los cambios de los hábitos de la población o de las intervenciones médicas, las migraciones y viajes de la población, y presiones selectivas que favorecen la aparición de agentes patógenos nuevos o mutantes, o de recombinaciones de los agentes patógenos existentes” (Aspectos Microbiológicos). Además, algunas personas desarrollan inmunidad, ya sea por la adquisición o por el contacto con algún agente patógeno o viene determinada ya sea por la edad, el sexo, el estado de salud o por la calidad de vida que tenga la persona. (Manual del Certificado de Manipulador de Alimentos, 2011)

En ciertos casos la concentración de los agentes patógenos en el agua pueden variar o en un aumento o en una disminución del inóculo generando así enfermedades como Síndrome Urémico Hemolítico y enfermedades dérmicas.

### **5.2.1. ESCHERICHIA COLI.**

Bacteria que reside en el tracto intestinal de humanos y animales de sangre caliente, estas bacterias desarrollan un papel importante en la fisiología del intestino “Por ser un habitante regular y normal del intestino se usa desde hace un siglo como “el mejor” indicador de contaminación con materia fecal. En este caso indica la contaminación con bacterias perjudiciales o patógenas para el hombre que tienen un hábitat común” (Michanie, 2003).

Aunque es poco probable que las condiciones de temperatura y la cantidad de nutrientes del agua favorezcan la proliferación de *Escherichia coli*, solo por medio de una reciente contaminación del agua con esta bacteria la ingestión accidental de esta, puede traer consigo asociados síntomas como brotes, diarrea y Síndrome Urémico Hemolítico afectando principalmente a niños y ancianos. (*Escherichia Coli* y Bacterias Termotolerantes)

### **5.2.2. SALMONELLA.**

Hace parte de un grupo de la familia *Enterobacteriaceae*, son bacilos gramnegativos móviles que no fermentan la lactosa, aunque la mayoría produce Sulfuro de Hidrogeno o gas por fermentación de los hidratos de carbono (*Salmonella*) , según estudios, esta es la causa más frecuente de enfermedades transmitidas por alimentos y consumo de agua de ríos, embalses y lagos, la *Salmonella* se encuentra en las heces fecales y en la orina de humanos y animales, estas bacterias se encuentran ampliamente distribuidas en la naturaleza, trayendo consigo fiebre tifoidea, fiebre paratifoidea, salmonellosis, brotes y enfermedades gastrointestinales.

La *salmonella* ha demostrado ser un excelente indicador epidemiológico para la determinación de diversas infecciones, además varios autores afirman que esta bacteria sirve como indicador ya que pueden sobrevivir aún más tiempo que los coliformes en el agua.

De acuerdo a una entrevista realizada en la Universidad de Chile se denota que la Salmonella se desarrolla mejor en ambientes con una temperatura igual a la del cuerpo humano:

*"Se desarrolla mejor en ambientes ricos en nutrientes y a temperatura ambiente. Su temperatura óptima de crecimiento es 37°C (la temperatura del cuerpo humano). Pero también se puede mantener viva en el agua (ríos o lagos con contaminación fecal). En el caso de Salmonella Enteritis se encuentra en el suelo del gallinero y así se contagian los pollos". (Osorio, 2011)*

Según una investigación las concentraciones del inóculo aumentan en los meses más calurosos del año, además podría resultar que las enfermedades aumenten por parte del calentamiento global. A pesar de que aún están por determinar los mecanismos exactos por los que las personas están expuestas a la contaminación ambiental de salmonella, un factor que podría estar fuertemente relacionado parte de las características del suelo: cuanto más porosos son, más riesgo hay de que el agua superficial y la subterránea se mezclen, especialmente cuando se producen precipitaciones. (Chavarrias, 2009).

## 6. MARCO NORMATIVO

Tabla 2: Normatividad aplicable al proyecto

ENTIDAD EMISORA	NORMATIVIDAD			ART. APLICABLES	REFERENCIA
	NORMA	AÑO	TITULO		
<b>Congreso de Colombia</b>	<b>Ley 373</b>	<b>1997</b>	Programa de Uso eficiente y ahorro del agua	Artículo 6	Regulación del consumo de agua
<b>Presidencia de la Republica</b>	<b>Decreto 2811</b>	<b>1974</b>	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente	Capitulo II	Reglamentación para la preservación del medio ambiente (agua, suelo, atmosfera, entre otros)
<b>Ministerio de Salud</b>	<b>Decreto 2115</b>	<b>1983</b>	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título II de la Ley 09 de 1979 en cuanto a potabilización del agua.	Art. 1, Cap II Art 4, Cap III, Cap V	Reglamenta los parámetros que se deben tener en cuenta para la potabilización de agua para consumo humano
<b>Ministerio de la Protección Social</b>	<b>Decreto 1575</b>	<b>2007</b>	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano	Art. 10 Parágrafo 3	En las edificaciones que conglomeren individuos, los responsables del mantenimiento y conservación locativa, deberán realizar el lavado y desinfección de los tanques de almacenamiento de agua para Consumo humano, como mínimo cada seis (6) meses



ENTIDAD EMISORA	NORMATIVIDAD			ART. APLICABLES	REFERENCIA
	NORMA	AÑO	TITULO		
<b>Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Dirección de Agua Potable, Saneamiento Básico y Ambiental).</b>	<b>Resolución 1096 RAS 2000</b>	<b>2000</b>	Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento Básico RAS 2000	N/A	El propósito de este es mostrar en forma consolidada las consideraciones de orden ambiental definidas en la normatividad vigente, así como fijar criterios básicos y requisitos mínimos de actuación por parte de las personas prestadoras de los servicios del sector, denominados medidas de manejo ambiental que se deben seguir para la construcción y operación de obras de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo que se desarrollen en la República de Colombia con el fin de minimizar o mitigar los impactos
<b>Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial</b>	<b>RESOLUCIÓN 240</b>	<b>2004</b>	Por la cual se definen las bases para el cálculo de la depreciación y se establece la tarifa mínima de la tasa por utilización de aguas	N/A	
<b>Ministerio De Ambiente Vivienda Y Desarrollo Territorial</b>	<b>RESOLUCIÓN 2115</b>	<b>2007</b>	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano	N/A	Esta resolución da los parámetros básicos para el control de la calidad del agua potable.

ENTIDAD EMISORA	NORMATIVIDAD			ART. APLICABLES	REFERENCIA
	NORMA	AÑO	TITULO		
Ministerio De Ambiente Vivienda Y Desarrollo Territorial	Resolución 2115	2007	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano	N/A	Esta resolución da los parámetros básicos para el control de la calidad del agua potable.
ISO	7704	1985	Water quality-- Evaluation of membrane filters used for microbiological analyses		Proporciona un procedimiento para la evaluación y la comparación de los filtros de análisis de agua destinada para el recuento de organismos específicos y poblaciones microbianas mixtas. El procedimiento proporciona directrices generales para las pruebas comparativas de las recuperaciones de bacterias, levaduras y otros hongos sobre filtros de membrana, en comparación con las recuperaciones por la placa de propagación y técnicas de verter la placa.
ISO	9308-1	2000	Water quality -- Detection and enumeration of Escherichia coli and coliform bacteria -- Part 1: Membrane filtration method		Especifica un método para la enumeración de E. coli y bacterias coliformes en el agua

ENTIDAD EMISORA	NORMATIVIDAD			ART. APLICABLES	REFERENCIA
	NORMA	AÑO	TITULO		
ISO	19458	2006	Water quality -- Sampling for microbiological analysis		Proporciona orientación sobre la planificación de sistemas de muestreo de agua, en los procedimientos de muestreo para el análisis microbiológico y en el transporte, manejo y almacenamiento de muestras hasta que comience el análisis. Se centra en la toma de muestras para investigaciones microbiológicas
ISO	5667-1	2006	Water quality -- Sampling -- Part 1: Guidance on the design of sampling programmes and sampling techniques		Establece los principios generales y proporciona orientación sobre el diseño de programas de muestreo y técnicas de muestreo para todos los aspectos de la toma de muestras de agua (incluidas las aguas residuales, lodos, vertidos y depósitos de fondo)
ISO	19250	2010	Water quality -- Detection of Salmonella spp		Especifica un método para la detección de Salmonella spp. (Presunta o confirmada) en muestras de agua. Es posible que, para fines epidemiológicos o durante las investigaciones de brotes, también se requieren otros medios de comunicación

Fuente: Autores del proyecto

## **7. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **7.1. HIPÓTESIS**

¿Influencian el tiempo de exposición a la radiación solar y el pH del agua el proceso de inactivación de microorganismos entero-patógenos?

### **7.2. TIPO**

La investigación que se realiza es de tipo experimental ya que se estudia la eficiencia de la depuración por la radiación ultravioleta solar de agua contaminada

### **7.3. METODOLOGÍA**

#### **7.3.1. DOCUMENTACIÓN PREVIA.**

Para el inicio del análisis y estudio de los procesos de depuración bacteriano en muestras en solución acuosa, se realizó la obtención de información basados en lo documentado en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Public Health Association, 2012), en el que se muestran los métodos estándar aplicables a la obtención de pruebas y incubación de cultivos para la generación de las muestras experimentales iniciales.

Se realizó la técnica de filtración por membrana debido a que es una técnica fácilmente reproducible la cual implica realizar una siembra directa en un medio de cultivo para la determinación de las colonias de bacterias, así como también es un método que arroja resultados más rápidamente que el método de tubos múltiples, aunque este también posee una limitación en el momento de tener una alta turbidez la cual afecta en el momento de realizar la filtración por la gran cantidad de partículas que llegan a obstruir el paso del agua por medio del filtro.

#### **7.3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL**

En el desarrollo se planteó un diseño de tipo central compuesto con cinco réplicas del punto central, en donde la variable de respuesta es el porcentaje de inactivación de las bacterias E. Coli y Salmonella y las variables experimentales son el pH (el cual se varió entre 6.5-8.0) estos rangos se tomaron por que están dentro de los valores de pH óptimos para el crecimiento de las bacterias, ya que si existen variaciones intensas en el pH se pueden dañar a los microorganismos alterando la membrana

plasmática y/o inhibiendo su actividad (Eduardo, 2007) y el tiempo de exposición a la radiación UV Solar (que fue variado entre 2-10 horas).

Las réplicas a realizar se encuentran en la **Tabla 3**.

**Tabla 3: Diseño experimental.**

Diseño experimental central compuesto, con 5 replicas del punto central	
pH	Tiempo de exposición (horas)
7,25	6
8,31	6
7,25	3,17
8,00	4
7,25	6
8,00	8
6,50	4
7,25	6
7,25	6
7,25	6
6,50	8
7,25	8,83

Fuente: Autores del proyecto

De acuerdo a lo anterior se tomaron dos muestras cada una de 1 litro de agua a las cuales se les adicionó materia fecal humana y sangre de pollo, el material y las características de las botellas que se utilizaron para todas las fases del proyecto fueron botellas transparentes conformadas en PET y con capacidad de de 600 ml y con la menor cantidad de corrugaciones posible ya que estas dificultan la entrada de los rayos UV al agua

A partir de esto se realizó una muestra inicial 10 ml de muestra y 100 ml de agua destilada para determinar la concentración de bacterias alojadas en el agua, a la que se le realizo el método de filtración por membrana para luego incubarla durante 24 horas a una temperatura de 36 °C.

Para el diseño experimental se tomaron 13 muestras en donde la proporción era de 40ml de muestra, 3ml de solución buffer compuesta de 42.6 g de fosfato di-básico de sodio ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) y 24 g de fosfato monobásico de sodio ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) diluidos en 1 litro de agua destilada, 550 ml de agua destilada e hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) y/o ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) siendo utilizados para modificar el pH , la cantidad dependía de que tanto se debía modificar el mismo, en las 13 muestras se variaba el tiempo de exposición a la radiación solar como se muestra en la **tabla 3**; luego de la exposición

se procedía a filtrar 100 ml de la muestra en el equipo de filtración por membrana, cuando la filtración terminaba se ubicaba el filtro en medios de cultivo ( para salmonella agar de Sulfito de Bismuto y para E. Coli agar Endo) estériles y deshidratados que humedecidos con 3.0-3.5 ml de agua destilada quedaban listos para meterlos en la incubadora por el mismo tiempo y temperatura de la muestra inicial.

Con los resultados que se obtuvieron en el diseño experimental se estableció el punto óptimo para la realización de la cinética, la cual determina la constante de remoción de las bacterias presentes en el agua, para esta fase del proyecto se tomaron 5 muestras que fueron expuestas a radiación solar por tiempos de 2, 4, 6, 8 y 10 horas respectivamente. Las proporciones en cuanto a la cantidad de muestra, solución buffer, modificador de pH y agua destilada es la misma cantidad que en el diseño experimental.

## 8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 8.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se genera el desarrollo de los experimentos basados en lo explicado en la sección 7.3.2 diseño experimental y teniendo en cuenta que el punto óptimo de eliminación de bacterias respecto a su pH es de 7.25 como se muestra en la tabla 4, debido al hecho que el valor de este y la exposición solar afectan de manera significativa el resultado de la inactivación de bacterias

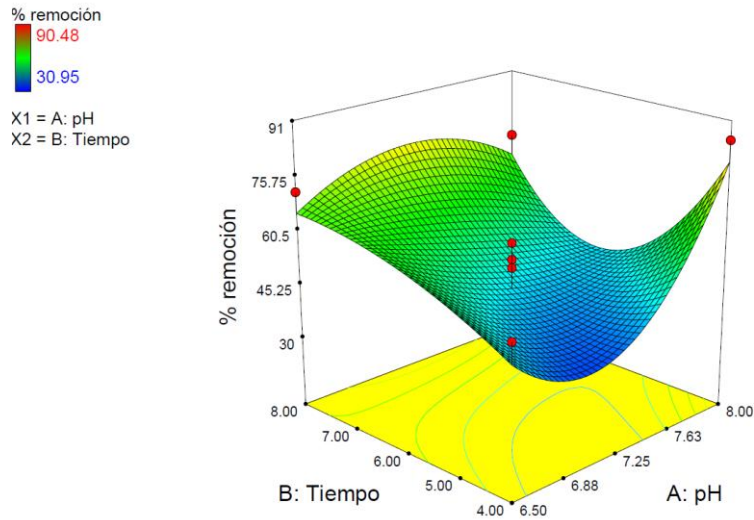
**Tabla 4: Porcentajes de remoción E. coli y Salmonella**

pH	Tiempo de exposición (horas)	% R E. coli	% R Salmonella
7,25	3,17	35,71%	85,71%
6,50	4	52,38%	73,02%
8,00	4	85,71%	77,78%
7,25	6	30,95%	87,30%
7,25	6	38,10%	88,89%
7,25	6	50,00%	88,89%
7,25	6	57,14%	87,30%
7,25	6	52,38%	84,13%
8,31	6	42,86%	85,71%
6,19	6	64,29%	88,89%
7,25	8,83	90,48%	95,24%
8,00	8	71,43%	93,65%
6,50	8	71,43%	79,37%

**Fuente: Autores del proyecto**

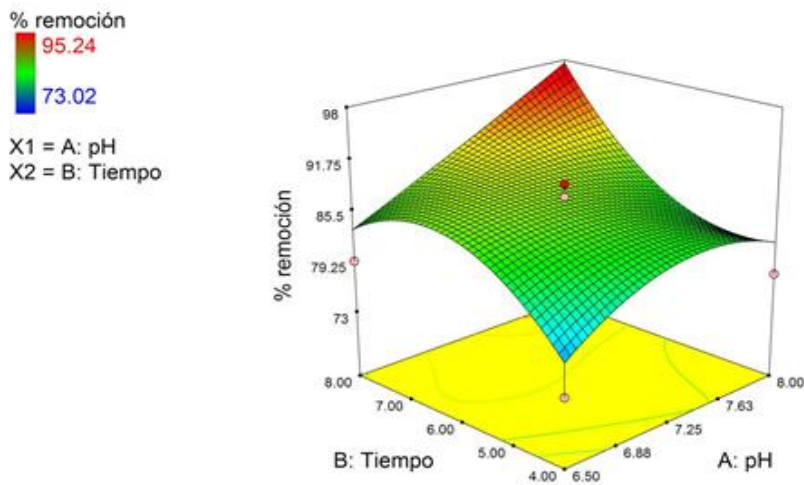
Los datos de la tabla 4 se cargaron en el programa Desing Expert 7.0 en donde se obtuvieron las superficies de respuesta para E. coli y Salmonella calculada con base a un modelo de primer orden , los cuales se presentan en gráficos tridimensionales mostrando el efecto que tiene la variación de pH y el tiempo de exposición sobre la inactivación de bacterias, cada franja de color tiene un numero bastante amplio de combinaciones Tiempo-pH para los cuales el porcentaje de remoción de bacterias se encuentra en un rango determinado como se observa en las figuras 2 y 3.

**Figura 2, Superficie de respuesta para E. Coli.**



En la figura 2 se observa la representación gráfica de la superficie de respuesta para la remoción de bacterias en función al tiempo de exposición y el pH. En la gráfica se observa que para bajos valores de pH con tiempos de exposición altos se obtiene los mayores valores de porcentaje de remoción pudiendo ser la variables de 7.25 unidades de pH y 8 horas de exposición los parámetros óptimos para un porcentaje de inactivación de E Coli de un 89% aproximadamente, lo anterior se corroboró con el uso del software Desing Expert 7.0, por medio del cual se determinó que los valores de pH y tiempo de exposición óptimos son los mencionados.

**Figura 3, Superficie de respuesta para Salmonella**



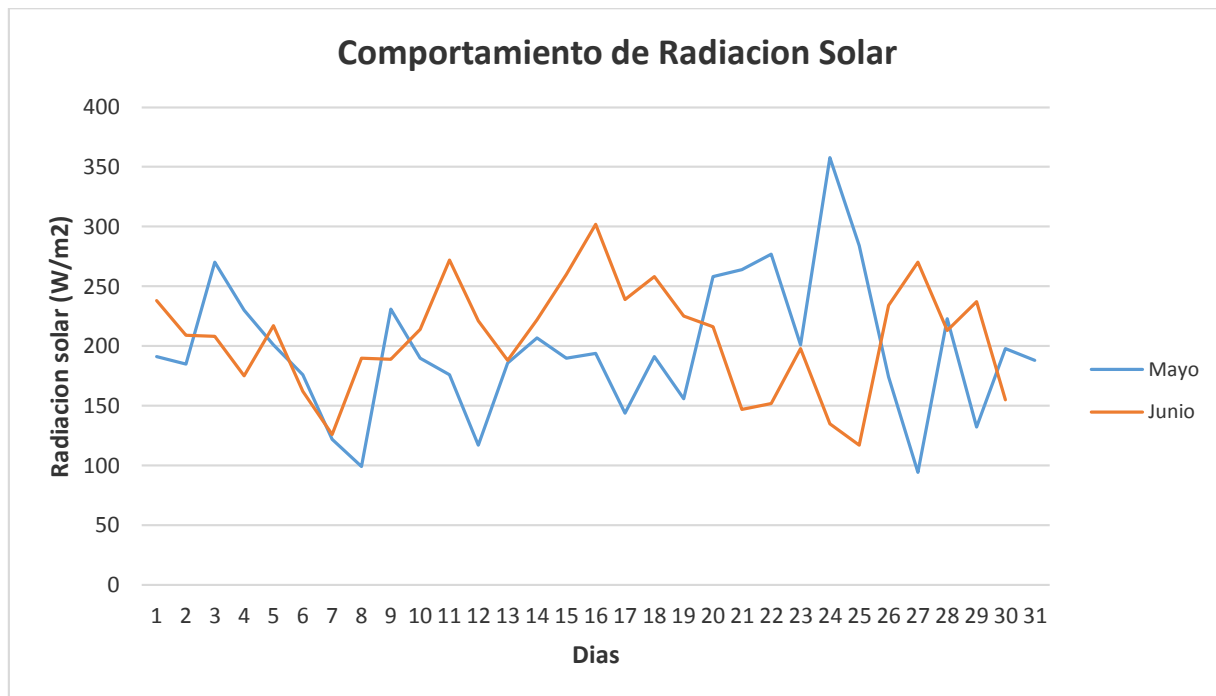


El modelo obtenido del análisis de superficie de respuesta en la figura 3 permite ver el comportamiento de las variables en el desarrollo del proceso de remoción de salmonella, demostrando que la combinación de altos valores de pH y altos tiempos de exposición de la muestra a la radiación solar dan como resultado un efecto positivo imponente sobre el proceso de remoción de bacterias, lo contrario ocurre con combinaciones de pH y tiempo de exposición bajas el porcentaje de remoción tiene un rango de 84% a 91%. Este comportamiento es similar al que presenta el proceso para la remoción de E. Coli.

## 8.2. COMPORTAMIENTO CINÉTICO

Teniendo el punto en el que el porcentaje de remoción fue el mayor en el diseño experimental se analiza el comportamiento que se presenta en el transcurso del día exponiendo la muestra a radiación solar.

Figura 4. Comportamiento de Radiación Solar meses mayo y junio



Fuente: Autores del proyecto

Se tomaron los datos de la estación meteorológica del Parque Simón Bolívar, siendo proporcionados por la Secretaria de Ambiente de Bogotá para el análisis del comportamiento de la radiación solar en los meses mayo y junio como se muestra en la figura 4 el día en que la mayor cantidad de radiación fue el 24 de mayo (358

W/m<sup>2</sup>), para determinar el comportamiento cinético de la inactivación de los microorganismos en estudio se realizó el día 13 de junio aportando un valor de 188 W/m<sup>2</sup> estando este valor dentro de un promedio de los demás días.

### 8.2.1. RESISTENCIA TÉRMICA DE LOS MICROORGANISMOS

Experimentalmente se puede comprobar que la destrucción de los microorganismos a una temperatura constante y en un medio dado sigue una cinética de primer orden siendo esta una función exponencial, es decir que mientras más aumente el tiempo de exposición hay un descenso exponencial del número de microorganismos sugiriendo que no existen efectos acumulativos, sino que la muerte se debe a la destrucción o inactivación irreversible de la bacteria o estructura de la misma (Alvarez, 2007):

$$-\frac{dN}{dt} = k_b N$$

Donde:

- N es la concentración de microorganismos en el medio
- t es el tiempo
- k es la constante cinética

El signo menos de la ecuación 1 indica que la concentración de microorganismos en el medio disminuye con el tiempo. Para saber cómo se reduce es necesario resolver la ecuación diferencial. En primer lugar se reordena la ecuación:

$$-\frac{dN}{N} = k_b dt$$

Para resolver la ecuación ya solo queda integrar utilizando como límites de integración la concentración de microorganismos ( $N_0$ ) cuando se inicia el tratamiento térmico ( $t= 0$ ) y que la concentración (N) a un tiempo t. por tanto

$$-\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t k_b dt$$

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -k_b t$$

Eliminando el logaritmo de la ecuación se obtiene

$$N = N_0 e^{-k_b t}$$

El comportamiento de inactivación de las bacterias que arroja el análisis en el laboratorio indica que a mayor tiempo de exposición solar el porcentaje de remoción de las bacterias es mayor como se puede observar en la tabla 5.

**Tabla 5: Cinética de inactivación**

Tiempo de exposición (hr)	E. coli final	Salmonella final	% Remoción E. coli	% Remoción Salmonella
0	43	17	0	0
2	26	14	39,53%	17,65%
4	15	10	65,12%	41,18%
6	11	3	74,42%	82,35%
8	4	2	90,70%	88,24%
10	1	1	97,67%	94,12%

**Fuente: Autores del proyecto**

Teniendo en cuenta que lo que se necesita es hallar la constante cinética  $k_b$  utilizando la ecuación cinética en su forma linealizada, la cual se presenta a continuación.

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -k_b t$$

Al graficar  $t$  contra  $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$  se debe obtener una línea recta en la cual la pendiente corresponde al valor del coeficiente cinético  $K_b$ . Resolviendo la ecuación con los datos obtenidos en la tabla 5 tenemos los siguientes resultados

**Tabla 6. Datos para correlacionar la forma linealizada de las respectivas ecuaciones cinéticas**

Tiempo (horas)	E. coli	Salmonela
0	0	0
2	-0,50310358	-0,194156014
4	-1,05314991	-0,530628251
6	-1,36330484	-1,734601055
8	-2,37490575	-2,140066163
10	-3,76120012	-2,833213344

Fuente Autores del proyecto

Estos resultados son los necesarios para obtener la constante cinética de inactivación de microorganismos, como se muestra en la tabla 7 para ecuaciones de primer orden.

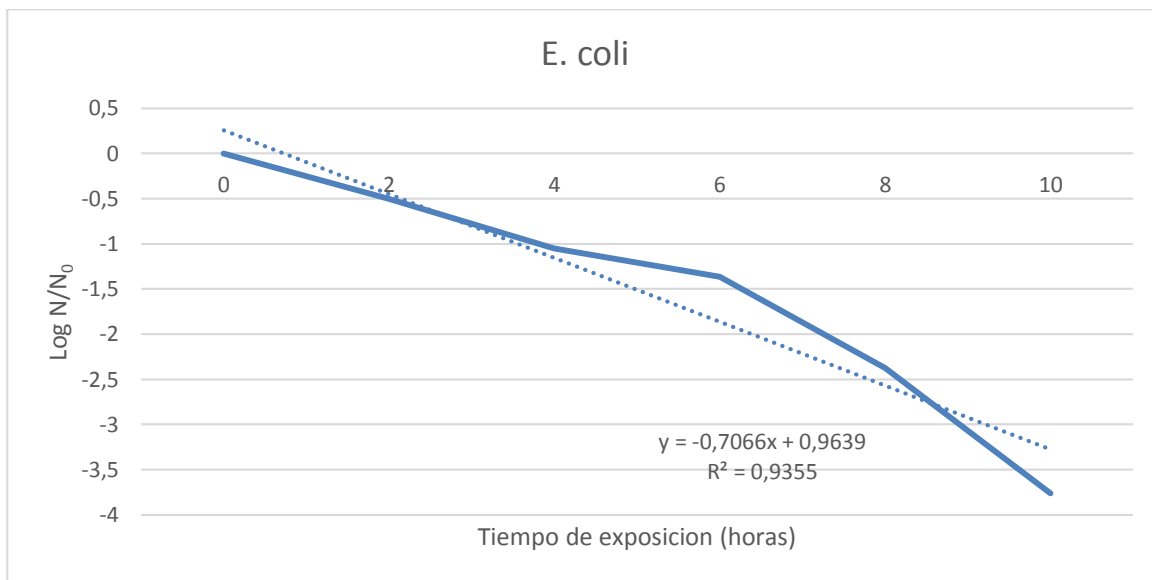
**Tabla 7. Constante de inactivación de microorganismos**

E. coli		Salmonela	
Pendiente	-0,35330803	Pendiente	-0,30296814
Correlación	0,9355177	Correlación	0,95505302

Fuente: Autores del proyecto

Se realiza una representación cualitativa de la cinética de inactivación de las bacterias E. coli y Salmonella como se muestra en las figuras 5 y 6.

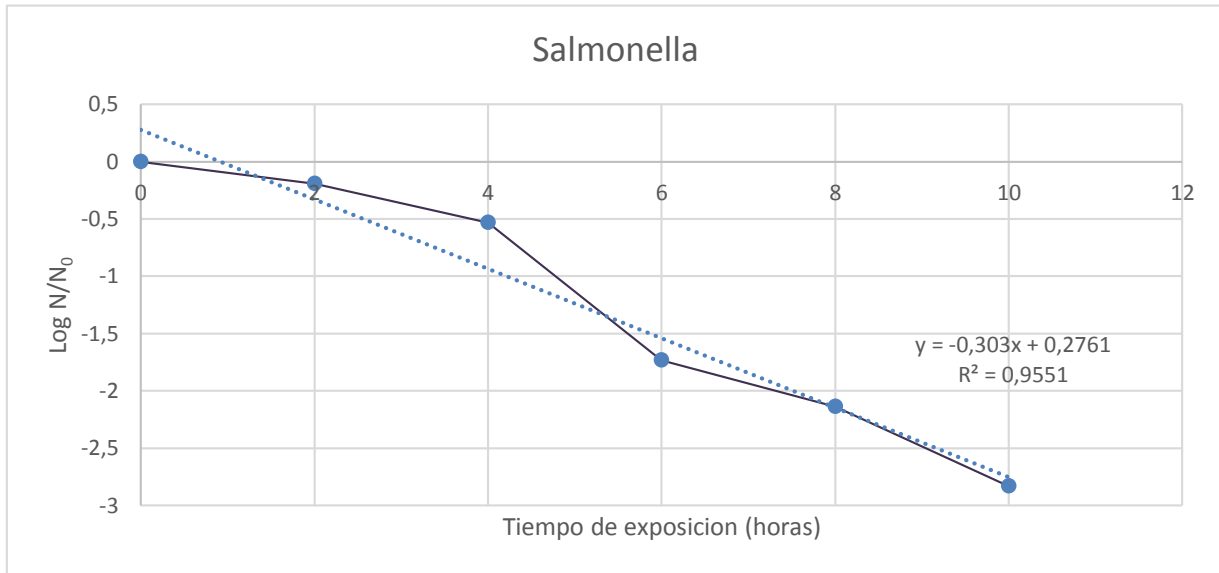
**Figura 5. Cinética de inactivación de E. coli**



Fuente: Autores del proyecto

Se puede observar que la gráfica nos permite formar una idea bastante aproximada sobre el tipo de relación existente entre dos variables. Por otro lado se muestra que el índice de correlación lineal  $R^2$  hallado es de 0.93 lo que indica que es muy próximo a 1 lo que nos confirma que la correlación es fuertemente positiva, también posee una pendiente de 0.7066 siendo esta la constante cinética del modelo de primer orden asemejándose al comportamiento de la cinética de la Ley de Chick

**Figura 6. Cinética de inactivación de Salmonella**



Fuente Autores del proyecto

Como se puede observar en la gráfica el coeficiente de correlación de la inactivación de Salmonella es de 0.95 siendo un rango de correlación fuerte, los puntos muy apartado de la línea recta se puede deber a algún cambio en las condiciones del proceso. También se puede apreciar que la tendencia cinética es una cinética de primer orden en la cual el coeficiente de degradación de Salmonella presenta un valor de  $0.303 \text{ horas}^{-1}$ ,

### 8.2.2. CINÉTICA DE INACTIVACION DE MICROORGANISMOS CON RADIACIÓN SOLAR.

Por medio del modelo cinético de primer orden se obtuvo la constante cinética para la extinción de E Coli y Salmonella, dado que en este modelo no se tiene en cuenta la intensidad de la radiación solar, se incorporara la ley de Chick para la cinética de inactivación de microorganismos por radiación solar.

$$N = N_0 e^{-kIT}$$

En donde

- $N_0$  es la concentración inicial de microbios previa a la aplicación de UV,
- $N$  es el número de microbios remanente después de la exposición a la luz UV,
- $I$  es la intensidad UV por unidad de superficie ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),
- $T$  es el tiempo de exposición (horas),

- k es la constante cinética de inactivación (horas<sup>-1</sup>) (J. Suarez),

Entonces se puede decir que

$$\ln \frac{N}{N_0} = -kIt$$

Al momento de despejar k de la ecuación se tiene que:

$$k = \frac{k_b}{I}$$

Entonces los datos de k son:

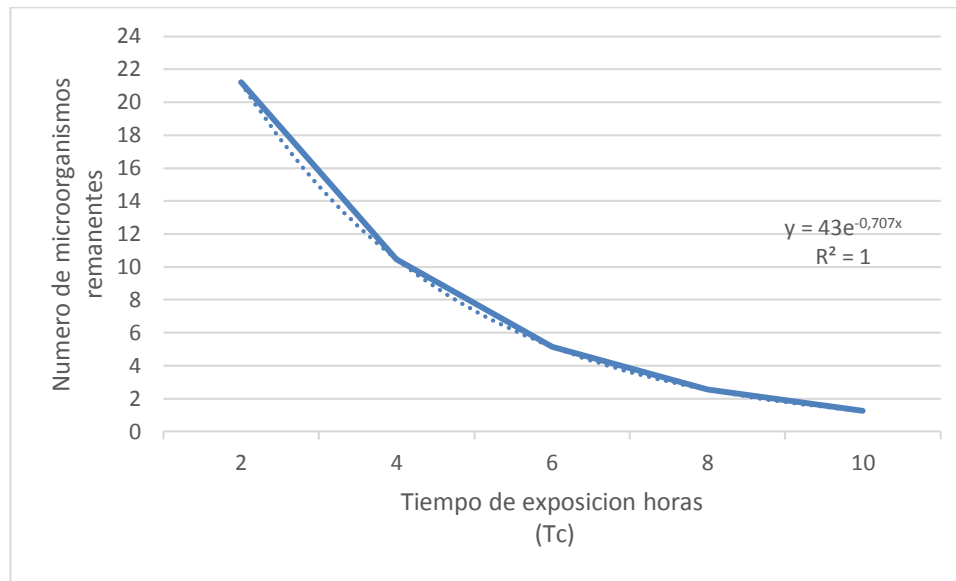
**Tabla 8. Constante de inactivación**

	E. coli	Salmonella
Kb (horas <sup>-1</sup> )	-0,35330803	-0,30296814
Intensidad UV (W/m <sup>2</sup> )	188	188
K (m <sup>2</sup> *horas <sup>-1</sup> *W <sup>-1</sup> )	-0,0018793	-0,00161153

El nuevo coeficiente cinético incorpora la intensidad de la radiación solar en la fórmula de la degradación, desaparición, extinción de las bacterias analizadas en el proyecto.

La grafica 7 presenta los datos experimentales obtenidos durante la determinación de la tendencia cinética del fenómeno, los datos son graficados junto a los datos que se obtiene a partir del modelo y se observa la similitud entre los taos experimentales y los teóricos, de ello se puede establecer que el modelo de Chick, con el coeficiente cinético determinado experimentalmente en este estudios dan lugar a una buena descripción del proceso de desinfección por radiación solar.

**Figura 7. Ley de Chick aplicada a E. coli**

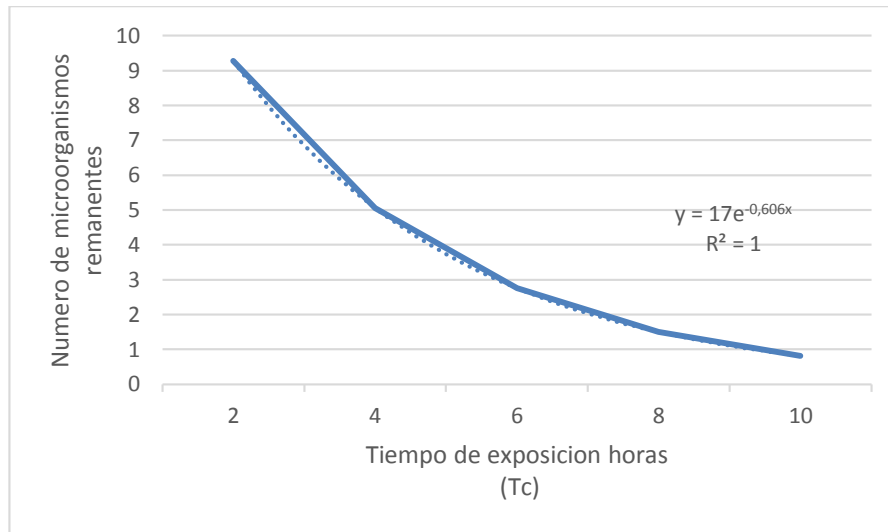


Fuente autores del proyecto

Aplicando la ley de Chick para E coli en los tiempos de exposición de 2, 4, 6, 8 y 10 horas se comprueba que la concentración de microorganismos tiende asintóticamente a cero al transcurrir el tiempo de exposición solar pero este nunca llega a cero. Lo que da a entender que a mayor a mayor tiempo de exposición solar los microorganismos presentes en el agua disminuye como se muestra en las figuras 7 y 8.

De manera similar a como se realizó para E Coli, el grafico 8 presenta la comparación entre los datos experimentales y los datos teóricos a partir del modelo de Chick obtenidos para la remoción de Salmonella.

**Figura 8: Ley de Chick aplicada a Salmonella**



Fuente: Autores del proyecto

Como se puede observar en la figura 8 el coeficiente de correlación es de 1 habiendo una correlación perfecta entre las variables estudiadas es decir que a medida que el tiempo de exposición aumenta la cantidad de microorganismos disminuye asintóticamente de forma directamente proporcional



## 9. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de los experimentos para la inactivación de E Coli y Salmonella con radiación solar demostraron que la tasa de inactivación de E. coli y Salmonella es elevada transcurridas las 10 horas de exposición, en las cuales se observó que se llega a inactivar entre un 94 % y 97% respectivamente.

De los ensayos se determinó que los valores de pH entre neutros y levemente alcalinos favorecen la inactivación de bacterias, lo cual se puede explicar con base en que la exposición del agua a la radiación solar estimula la producción de radicales  $\text{OH}^*$ , siendo estos una de los agentes oxidantes más fuertes que existen y contribuyendo a la eliminación de microorganismos patógenos presentes en el agua.

La inactivación de microorganismos empleando radiación solar es una técnica económica, que emplea una fuente de energía natural y que puede ser aplicable en lugares apartados que presente carencias de agua potable y dificultades para el suministro de insumos químicos para la potabilización.

Los prolongados tiempos de tratamiento requeridos para la inactivación demanda grandes áreas para la implementación del proceso.

Las botellas deberán exponerse a los rayos solares orientándolas con su eje en dirección Norte Sur, buscando así que sin importar la Latitud del lugar, los rayos lleguen a las botellas casi perpendicularmente en todo momento minimizando la reflexión en la superficie del PET y optimizando así los resultados.

Este método es apto para zonas en donde las poblaciones no poseen ninguna forma de desinfección del agua que los proteja de enfermedades gastrointestinales a causa de la ingestión de la misma, ya que no se requieren muchos recursos ni económicos ni físicos (materiales, mano de obra, entre otros) y contribuye a mejorar la calidad de vida los habitantes de estas regiones.

## 10. RECOMENDACIONES

El método es aplicable para la depuración del agua de consumo en viviendas campesinas filtrando previamente el agua con filtros de piedra o arcilla cocida y manejando grupos de botellas que antes de su reutilización sean previamente enjuagadas con vinagre. Así los tiempos de tratamiento requeridos para la inactivación pueden cumplirse entre uno y dos días, sin que se requieran grandes áreas para la implementación del proceso.



Se recomienda que las botellas sean expuestas durante todo el día, con el objeto de que reciban la mayor cantidad de radiación posible, para eliminar la totalidad de los microorganismos de origen fecal y los patógenos. Por otro lado es importante la filtración del agua lo que ayuda a disminuir la cantidad de partículas suspendida en el agua lo que aumenta el paso de la radiación solar.

Se puede incrementar la eficiencia de la radiación solar, usando mecanismos de reflexión con concentradores solares que aumenten la intensidad de la radiación solar que llega a las botellas para disminuir el tiempo de exposición solar, incrementando la eficiencia del proceso. Así como también se pueden usar recipientes de vidrio los cuales mantienen por más tiempo la temperatura ayudando a la inactivación de bacterias en un tiempo más corto.

Realizar ensayos empleando un catalizador para mejorar la desinfección.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

1. (s.f.). Recuperado el 21 de 04 de 2013, de Escherichia Coli y Bacterias Termotolerantes: [http://www.bvsde.paho.org/cd-gdwq/docs\\_microbiologicos/Indicadores%20PDF/Ecoli\\_bacterias\\_termo.pdf](http://www.bvsde.paho.org/cd-gdwq/docs_microbiologicos/Indicadores%20PDF/Ecoli_bacterias_termo.pdf)
2. (s.f.). Recuperado el 20 de Abril de 2013, de [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3\\_es\\_7\\_fig.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_7_fig.pdf)
3. Alejandra M.; Ma. Teresa A.; Ignacio M.; Arturo G. (2005, Enero) *Efficiency in the disinfection of water for human consumption in rural communities using solar radiation*, Solar Energy, Volume 78, Issue 1, January 2005, Pages 31-40
4. Andréa R.; Fátima de Cássia.; Marcos Paulo P.; Júlia S.; Verônica P. (2013, Enero) *Efficiency of PET reactors in solar water disinfection for use in southeastern Brazil*, Solar Energy, Volume 87, January 2013, Pages 158-167
5. Ashbolt NJ, Grabow WOK y Snozzi M, 2001: Indicators of microbial water quality. En: Fewtrell L, Bartram J, (eds.) *Water quality: Guidelines, standards and health –Assessment of risk and risk management for water-related infectious disease*. Serie de monografías de la OMS sobre el agua (*Water Series*). Londres (Reino Unido), IWA Publishing, págs. 289–315.
6. Auriolos Moreno, J. A., Alvares Morales , S., & Castañeda Gonzalez, I. (1 de Diciembre de 2008). Sistemas de Reciclaje de agua. Mexico, D.F.
7. Barrenechea Martel, A., & Vargas, L. (s.f.). *Ministerio de medio ambiente de Peru*. Recuperado el Mayo de 2013, de <http://cdam.minam.gob.pe:8080/bitstream/123456789/109/12/CDAM0000012-11.pdf>
8. Chavarrias, M. (2009). Agua superficial contaminada con Salmonella. Revista *Eroski Consumer*
9. Center, C. W. (s.f.). Bacterias Coliformes. *EPA (2006), "Drinking Water Contaminants, Microbes,"*. California, Estados Unidos.
10. Cesar, J., & Gonzalo, T. (2006). la fotocatalisis: Aspectos fundamentales para una buena remocion de contaminantes. *Revista Universidad de Caldas*, 71-88.

11. Cristina Celia, S. B.; Patricia de Campos, G. M.; Barbara, M. F.; Carolina, A. (2000, diciembre) Avaliação da desinfecção solar na região Centro -Oeste do Brasil usando diferentes organismos indicadores de contaminação. Ponencia presentada en Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Porto Alegre, Brasil.
12. Cuesta, J., Mattar , S., & Parra, M. (s.f.). Caracterización molecular de cepas de E. coli aisladas e humanos en Bogotá, D.C. *Salud UIS*, 116-121.
13. EAWAG / SANDEC (2002) Desinfección Solar del Agua: Una guía para la aplicación de SODIS. SANDEC Informe n ° 06/02
14. Edison, G. P. (2002). Fotocatálisis: una alternativa viable para la eliminación de compuestos orgánicos. Red de revistas científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal, 127,59-64
15. George I *et al.*, 2001: Use of rapid enzymatic assays to study the distribution of faecal coliforms in the Seine river (France). *Water Science and Technology*, 43:77–80.
16. Grabow WOK, 1996: Waterborne diseases: *Update on water quality assessment and control*. *Water SA*, 22:193–202.
17. H. B. Wright y W. L. Cairns. Desinfección por medio de luz ultravioleta. Trojan Technologies Inc. Recuperado el día 12, Febrero, 2013, de <http://www.ingenieroambiental.com/2info/ultravio.pdf>
18. Hipólito G.; María F.; Kevin G.; Elvira A. (2009, Octubre) *Effect of the radiation intensity, water turbidity and exposure time on the survival of Cryptosporidium during simulated solar disinfection of drinking water*, *Acta Tropica*, Volume 112, Issue 1, Pages 43-48
19. Inocencio Tony P. (1991) *El hombre y su ambiente atmosférico*. Madrid: Instituto Nacional de meteorología
20. Isabel Oller A. (2008). *Depuración de Aguas Contaminadas con Tóxicos persistentes mediante combinación de Fotocatálisis Solar y Oxidación Biológica*. Tesis Doctoral. Universidad de Almería, Departamento de Ingeniería Química

21. Jhon Vidal D., Adolfo Consuegra S., Luty Gomescaseres P., Jose Marrugo N.(2009). *Evaluación de la calidad microbiológica del Agua envasada en bolsas producida en Sincelejo – Colombia*. Universidad de Sucre, Facultad de Educación y Ciencias, Grupo de Investigación Conservación del Recurso Hídrico y Alimentos (CRHIA). Sincelejo, Colombia.
22. Marco Antonio Almeida de Souza et al. Patricia Campos Gomes Monteiro,; Cristina Célia Silveira Brandão,; Bernardes, Ricardo Silveira (1999, mayo) Desinfecção Solar: Proposta de metodologia de estudo de viabilidade e determinação dos parâmetros básicos. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 20 FERIA Internacional de Tecnologías de Saneamiento Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil
23. Michanie, S. (2003). *Escherichia Coli O157: H7 La bacteria que disparo el HACCP en la industria de la carne*.
24. Mireya del Pilar A. P., Sara Lilia Á., Sandra E. T., Aura Cristina G. P. (2005). *Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua*. División de Investigaciones, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca
25. Myrick Freeman III, A. (1999). Control de la contaminación del agua y del aire evaluación de costo-beneficio. Editorial limusa s.a de c.v grupo noriega editores. Juan Carlos, V. G., Carolina, O. P. (2008). *Calidad microbiológica del agua parásitos, bacterias y toxinas de origen biológico*. Ediciones Unisinú.
26. Muna H.; Ashraf A. (2010, Septiembre) *Investigating the efficiency of solar energy system for drinking water disinfection, Desalination*, Volume 259, Issues 1–3, 15 September 2010, Pages
27. Nelson Antonio, S. T. (1987) *Radiación solar e instrumentos meteorológicos utilizados para medirla*. Bogotá: Instituto colombiano de hidrología meteorología y adecuación de tierras HIMAT
28. OMS. (1998). *Guias para la calidad del agua potable*. Ginebra: OMS.
29. Osorio, D. I. (28 de Septiembre de 2011). Salmonella, un microorganismo patógeno siempre presente . (B. Lopez, Entrevistador)
30. Ramirez, C. A. (2011). *Calidad del agua evaluacion y diagnostico*. Medellin: Ediciones de la U.

31. Rincón Acero, D. P., & Ramírez Rue, R. Y. (2011). Transmisión de Salmonella enterica a través de huevo de gallina y su importancia en salud pública . *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud.*
32. *Salmonella.* (s.f.). Recuperado el 21 de Abril de 2013, de [http://www.bvsde.paho.org/cd-gdwq/docs\\_microbiologicos/Bacterias%20PDF/Salmonella.pdf](http://www.bvsde.paho.org/cd-gdwq/docs_microbiologicos/Bacterias%20PDF/Salmonella.pdf)
33. Silvia, M (2003). Escherichia coli O157:H7 La bacteria que disparo el HACCP en la industria de la carne
34. Sueiro RA *et al.*, 2001: Evaluation of Coli-ID and MUG Plus media for recovering *Escherichia coli* and other coliform bacteria from groundwater samples. *Water Science and Technology*, 43:213–216.
35. Wayne H., Simon K., ( 2011, Agosto) *The efficacy of simulated solar disinfection (SODIS) against Ascaris, Giardia, Acanthamoeba, Naegleria, Entamoeba and Cryptosporidium*, *Acta Tropica*, Volume 119, Issues 2–3, August 2011, Pages 138-143
36. Wilmin P. M. (2007) *Diseño de un colector solar para el tratamiento de lixiviados de residuos sólidos*. Trabajo de grado. Universidad Libre, Departamento de Ingeniería Ambiental

## 12. ANEXOS

**Tabla 9. Anova para superficie de respuesta de E. coli**

Use your mouse to right click on individual cells for definitions.

Response 1 % remoción

ANOVA for Response Surface Cubic Model (Aliased)

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	3442.58	7	491.80	3.27	0.1055 not significant
A-pH	229.62	1	229.62	1.53	0.2717
B-Tiempo	1499.88	1	1499.88	9.96	0.0252
AB	277.72	1	277.72	1.84	0.2324
A <sup>2</sup>	331.79	1	331.79	2.20	0.1978
B <sup>2</sup>	946.77	1	946.77	6.29	0.0540
A <sup>2</sup> B	660.42	1	660.42	4.39	0.0904
AB <sup>2</sup>	506.20	1	506.20	3.36	0.1261
A <sup>3</sup>	0.000	0			
B <sup>3</sup>	0.000	0			
Residual	752.65	5	150.53		
Lack of Fit	283.34	1	283.34	2.41	0.1951 not significant
Pure Error	469.31	4	117.33		
Cor Total	4195.23	12			

The "Model F-value" of 3.27 implies the model is not significant relative to the noise. There is a 10.55 % chance that a "Model F-value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case B are significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

The "Lack of Fit F-value" of 2.41 implies the Lack of Fit is not significant relative to the pure error. There is a 19.51% chance that a "Lack of Fit F-value" this large could occur due to noise. Non-significant lack of fit is good -- we want the model to fit.

Std. Dev.	12.27	R-Squared	0.8206
Mean	57.14	Adj R-Squared	0.5694
C.V. %	21.47	Pred R-Squared	-3.4973
PRESS	18866.99	Adeq Precision	5.691

A negative "Pred R-Squared" implies that the overall mean is a better predictor of your response than the current model.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 5.691 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient		df	Standard Error	95% CI		VIF
	Estimate				Low	High	
Intercept	45.71		1	5.49	31.61	59.82	
A-pH	-7.58		1	6.13	-23.35	8.19	2.00
B-Tiempo	19.36		1	6.13	3.59	35.13	2.00
AB	-8.33		1	6.13	-24.10	7.44	1.00
A <sup>2</sup>	6.91		1	4.65	-5.05	18.86	1.02
B <sup>2</sup>	11.67		1	4.65	-0.29	23.62	1.02
A <sup>2</sup> B	-18.17		1	8.68	-40.47	4.13	2.00
AB <sup>2</sup>	15.91		1	8.68	-6.39	38.21	2.00

A<sup>3</sup> ALIASED A, AB<sup>2</sup>

B<sup>3</sup> ALIASED B, A<sup>2</sup>B

=====

**WARNING**

The model you selected has terms that are aliased with one another. If you continue, the least squares parameter estimates for aliased models will not be unique and the resulting contour plots will be misleading.

=====



**Tabla 10. Optimización de E. coli**

<b>Constraints</b>						
<b>Name</b>	<b>Goal</b>	<b>Lower Limit</b>	<b>Upper Limit</b>	<b>Lower Weight</b>	<b>Upper Weight</b>	<b>Importance</b>
pH	is in range	6.5	8	1	1	3
Tiempo	is in range	4	8	1	1	3
% remoción	maximize	30.95	100	1	1	5

<b>Solutions</b>					
<b>Number</b>	<b>pH</b>	<b>Tiempo</b>	<b>% remoción</b>	<b>Desirability</b>	
1	<u>8.00</u>	<u>4.00</u>	<u>79.7587</u>	<u>0.707</u>	<u>Selected</u>
2	7.25	8.00	76.7442	0.663	
3	7.24	8.00	76.7433	0.663	

**3 Solutions found**

**Number of Starting Points: 30**

<b>pH</b>	<b>Tiempo</b>		
7.438	6.638	7.958	7.279
7.524	5.924	6.767	5.322
6.868	6.729	7.839	6.175
6.579	7.162	7.825	6.272
7.769	7.677	6.736	6.774
7.012	6.276	7.955	6.376
7.476	7.474	7.320	4.627
6.581	7.185	7.381	4.074
7.587	7.285	7.321	4.085
7.037	5.414	6.987	4.071
7.668	4.291	6.948	5.460
7.354	4.729	7.947	6.788
7.735	6.399	7.448	7.036
6.879	6.432	6.647	7.462
6.973	4.904		
7.763	4.446		

**Tabla 11. Anova para superficie de respuesta Salmonella**

Use your mouse to right click on individual cells for definitions.

**Response 1 % remoción**

**ANOVA for Response Surface Cubic Model (Aliased)**

**Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]**

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	314.71	7	44.96	1.59	0.3140	not significant
<i>A-pH</i>	5.06	1	5.06	0.18	0.6895	
<i>B-Tiempo</i>	45.41	1	45.41	1.61	0.2602	
<i>AB</i>	22.66	1	22.66	0.80	0.4111	
<i>A<sup>2</sup></i>	27.39	1	27.39	0.97	0.3696	
<i>B<sup>2</sup></i>	1.09	1	1.09	0.039	0.8516	
<i>A<sup>2</sup>B</i>	9.55	1	9.55	0.34	0.5857	
<i>AB<sup>2</sup></i>	69.25	1	69.25	2.46	0.1778	
<i>A<sup>3</sup></i>	0.000	0				
<i>B<sup>3</sup></i>	0.000	0				
Residual	140.95	5	28.19			
<i>Lack of Fit</i>	125.85	1	125.85	33.33	0.0045	significant
<i>Pure Error</i>	15.11	4	3.78			
Cor Total	455.66	12				

The "Model F-value" of 1.59 implies the model is not significant relative to the noise. There is a 31.40 % chance that a "Model F-value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.

In this case there are no significant model terms.

Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy), model reduction may improve your model.

The "Lack of Fit F-value" of 33.33 implies the Lack of Fit is significant. There is only a 0.45% chance that a "Lack of Fit F-value" this large could occur due to noise.

Significant lack of fit is bad -- we want the model to fit.

Std. Dev.	5.31	R-Squared	0.6907
Mean	85.84	Adj R-Squared	0.2576
C.V. %	6.19	Pred R-Square	-16.7280
PRESS	8077.94	Adeq Precisor	4.953

A negative "Pred R-Squared" implies that the overall mean is a better predictor of your response than the current model.

"Adeq Precision" measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 4.953 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Factor	Coefficient	df	Standard	95% CI		VIF
	Estimate		Error	Low	High	
Intercept	87.30	1	2.37	81.20	93.41	
A-pH	-1.12	1	2.65	-7.95	5.70	2.00
B-Tiempo	3.37	1	2.65	-3.45	10.19	2.00
AB	2.38	1	2.65	-4.44	9.20	1.00
A <sup>2</sup>	-1.98	1	2.01	-7.16	3.19	1.02
B <sup>2</sup>	-0.40	1	2.01	-5.57	4.78	1.02
A <sup>2</sup> B	2.19	1	3.75	-7.47	11.84	2.00
AB <sup>2</sup>	5.88	1	3.75	-3.77	15.54	2.00

A<sup>3</sup> ALIASED A, AB<sup>2</sup>

B<sup>3</sup> ALIASED B, A<sup>2</sup>B

=====

**WARNING**

The model you selected has terms that are aliased with one another.

If you continue, the least squares parameter estimates for aliased models will not be unique and the resulting contour plots will be misleading.

=====

### Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\begin{aligned} \% \text{ remoción} = & \\ & +87.30 \\ & -1.12 * A \\ & +3.37 * B \\ & +2.38 * A * B \\ & -1.98 * A^2 \\ & -0.40 * B^2 \\ & +2.19 * A^2 * B \\ & +5.88 * A * B^2 \end{aligned}$$

### Final Equation in Terms of Actual Factors:

Not available for ALIASED models.

The Diagnostics Case Statistics Report has been moved to the Diagnostics Node.  
In the Diagnostics Node, Select Case Statistics from the View Menu.

Proceed to Diagnostic Plots (the next icon in progression). Be sure to look at the:

- 1) Normal probability plot of the studentized residuals to check for normality of residuals.
- 2) Studentized residuals versus predicted values to check for constant error.
- 3) Externally Studentized Residuals to look for outliers, i.e., influential values.
- 4) Box-Cox plot for power transformations.

If all the model statistics and diagnostic plots are OK, finish up with the Model Graphs icon.

**Tabla 122.Optimización para Salmonella**

**Constraints**

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
pH	is in range	6.5	8	1	1	3
Tiempo	is in range	4	8	1	1	3
% remoción	maximize	73.02	100	1	1	5

**Solutions**

Number	pH	Tiempo	% remoción	Desirability	
1	<u>8.00</u>	<u>8.00</u>	<u>97.6162</u>	<u>0.912</u>	<u>Selected</u>

**1 Solutions found**

**Number of Starting Points: 30**

pH	Tiempo
7.598	7.676
6.869	6.053
7.590	5.060
7.922	4.022
6.522	5.732
7.032	4.075
7.034	4.006
7.489	6.806
7.462	7.171
7.135	7.126
7.904	5.414
6.889	4.632
7.748	6.171
6.795	5.711
7.991	6.010
7.838	7.480
6.990	7.175
7.020	7.718

## 12.1. FOTOGRAFIAS DISEÑO EXPERIMENTAL

Foto 1. Muestras diseño experimental



Foto 2. Muestra inicial E. coli



Foto 3. Muestra inicial Salmonella

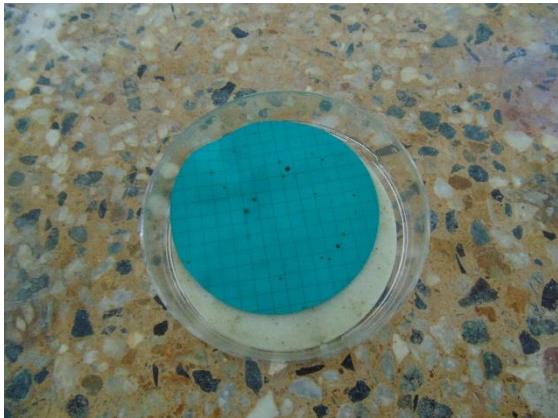


Foto 4. Muestra 1 de E. coli y Salmonella

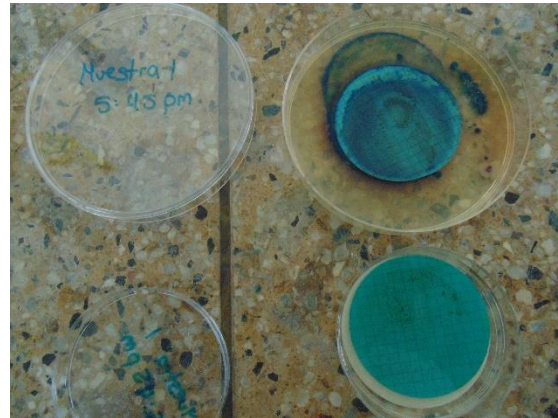


Foto 5. Muestra 2 E. coli y Salmonella

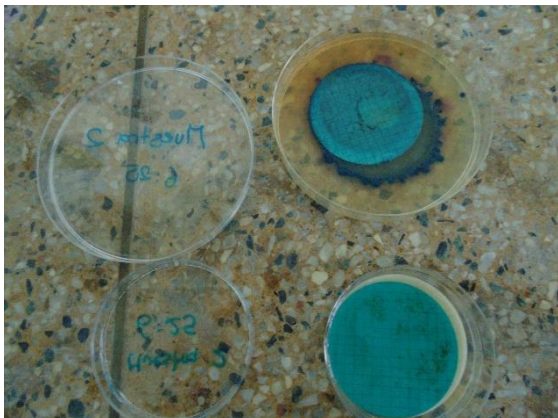


Foto 6. Muestra 3 E. coli y Salmonella



Foto 7. Muestra 4 E. coli y Salmonella

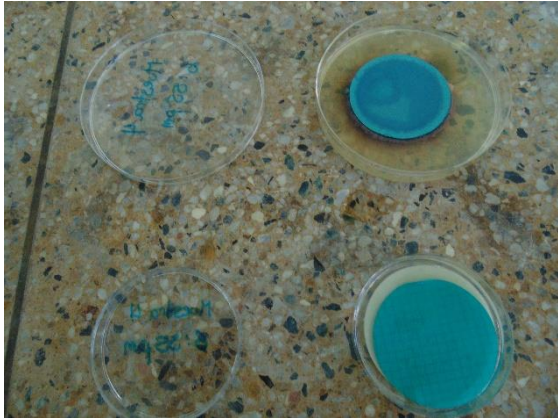


Foto 8. Muestra 5 E. coli y salmonella

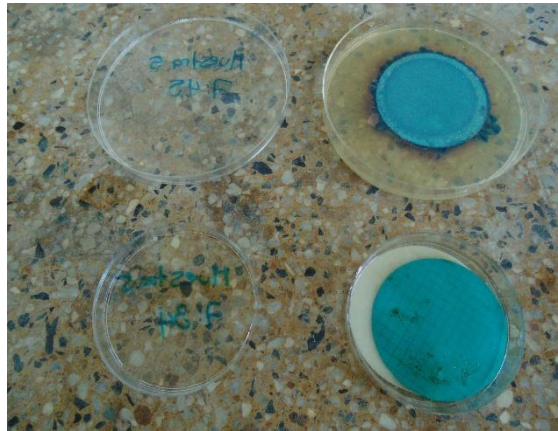


Foto 9. Muestra 6 E. coli y Salmonella

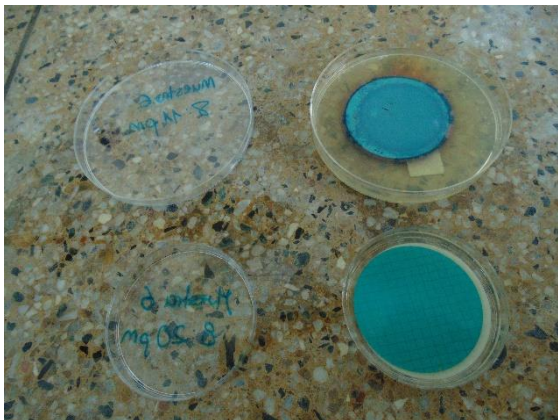


Foto 10. Muestra 7 E. coli y Salmonella

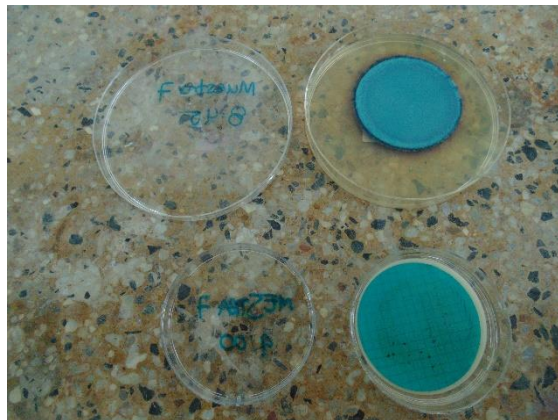


Foto 11. Muestra 8 E. coli y Salmonella

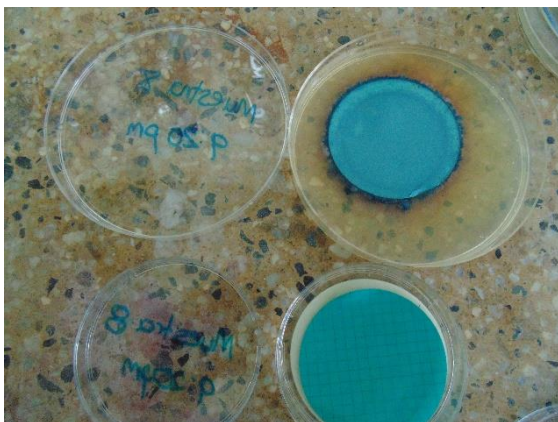


Foto 12. Muestra 9 E. coli y Salmonella



Foto 13. Muestra 10 E. coli y Salmonella

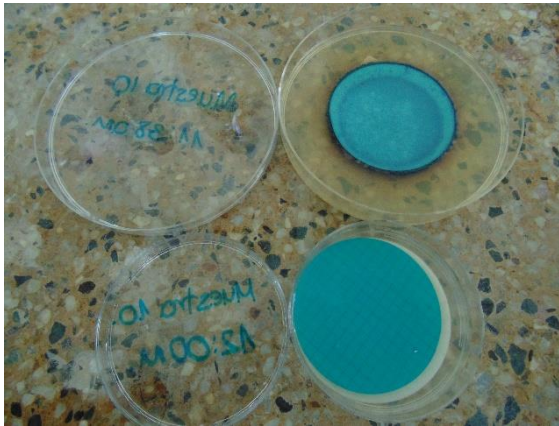


Foto 14. Muestra 11 E. coli y Salmonella

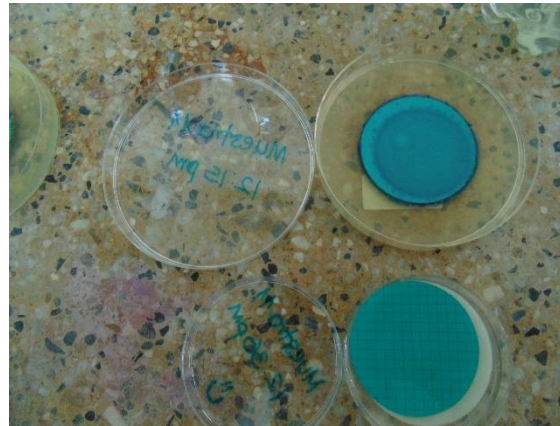


Foto 15. Muestras 12 E. coli y Salmonella

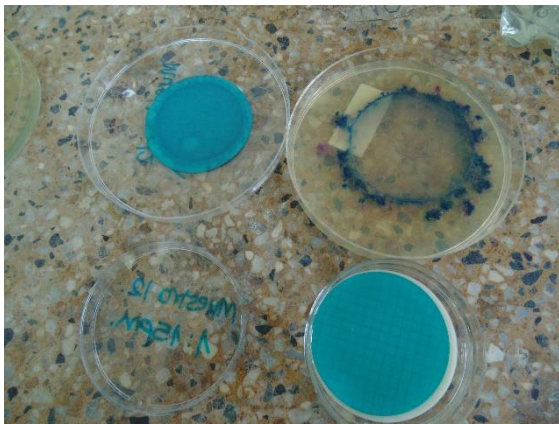


Foto 16. Muestra 13 E. coli y Salmonella

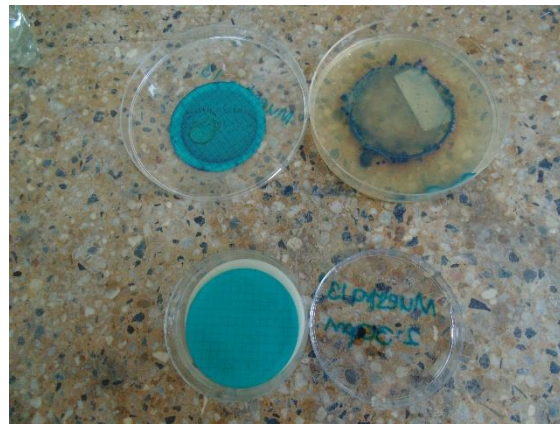


Foto 17. Muestras artesanales E. coli y Salmonella.





## 12.2. FOTOGRAFIAS CINETICA DE INACTIVACIÓN

Foto 18. Muestras expuestas a radiación solar



Foto 19. Muestra inicial E. Coli

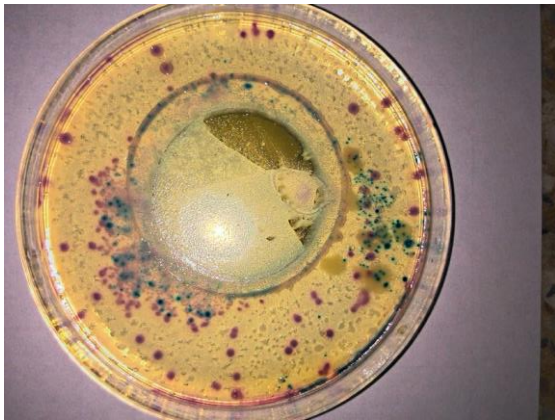


Foto 21. E coli 2 horas de exposición

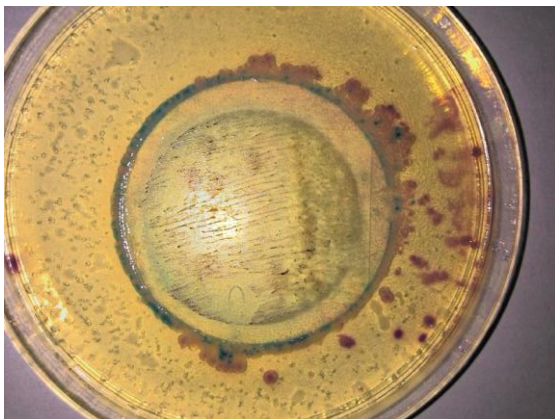


Foto 20. Muestra inicial Salmonella



Foto 22. Salmonella 2 horas de exposición



Foto 23. E coli 4 horas de exposición

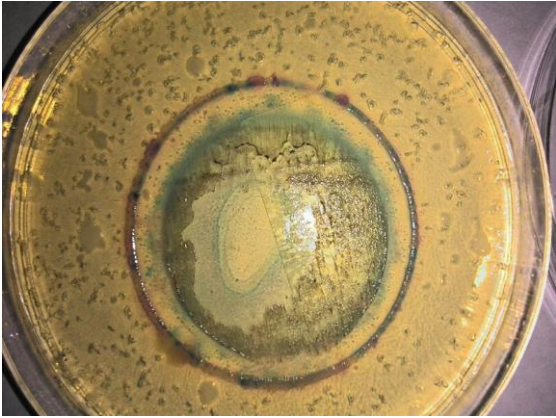


Foto 24. Salmonella 4 horas de exposición



Foto 25. E. coli 6 horas de exposición



Foto 26. Salmonella 6 horas de exposición

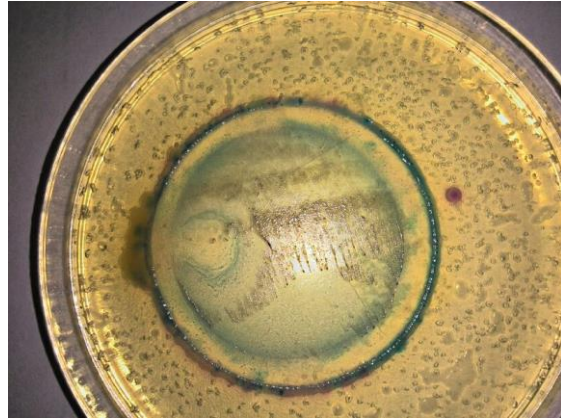


Foto 27. E. coli 8 horas de exposición

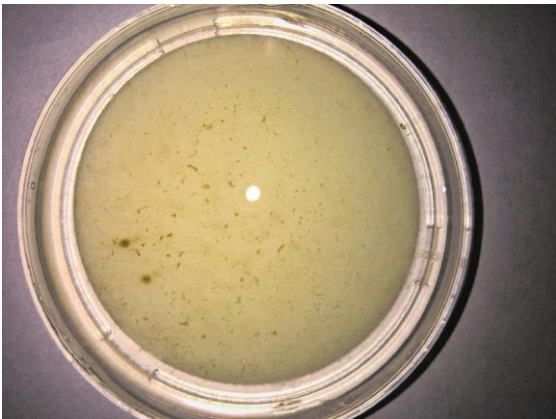


Foto 28. Salmonella 8 horas de exposición

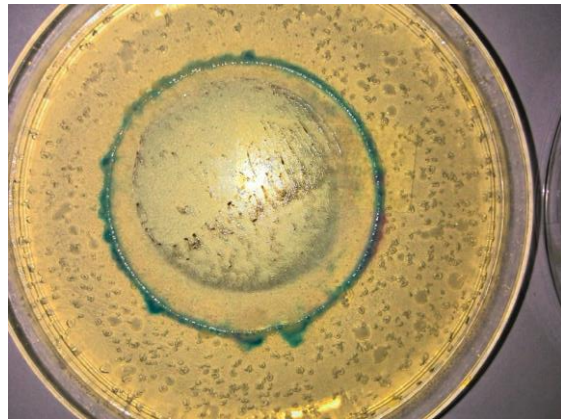


Foto 29. E. coli 10 horas de exposición



Foto 30. Salmonella 10 horas de exposición

