

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

*Trabajo de titulación previo a  
la obtención del título de  
Ingeniero Ambiental*

**TRABAJO EXPERIMENTAL:**

**“ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE DESINFECCIÓN UV; CINÉTICAS DE  
INACTIVACIÓN Y REACTIVACIÓN EN BACTERIAS E. COLI”**

**AUTOR:**

LUIS MIGUEL ESPINOZA MORA

**TUTORA:**

ING. PAOLA JACKELINE DUQUE SARANGO, MSc

CUENCA - ECUADOR

2021

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Luis Miguel Espinoza Mora con documento de identificación N° 0106150352, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: **“ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE DESINFECCIÓN UV; CINÉTICAS DE INACTIVACIÓN Y REACTIVACIÓN EN BACTERIAS E. COLI”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Ambiental*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, octubre de 2021.

A handwritten signature in blue ink that reads "Luis Miguel". The signature is stylized with a large, sweeping flourish that loops around the name.

Luis Miguel Espinoza Mora

C.I. 0106150352

## CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE DESINFECCIÓN UV; CINÉTICAS DE INACTIVACIÓN Y REACTIVACIÓN EN BACTERIAS E. COLI”**, realizado por Luis Miguel Espinoza Mora, obteniendo el *Trabajo Experimental* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, octubre de 2021.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Paola Jackeline Duque Sarango', written over a horizontal line.

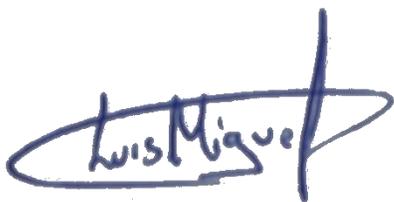
Ing. Paola Jackeline Duque Sarango

C.I. 1104257835

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Luis Miguel Espinoza Mora con documento de identificación N° 0106150352, autor del trabajo de titulación: **“ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE DESINFECCIÓN UV; CINÉTICAS DE INACTIVACIÓN Y REACTIVACIÓN EN BACTERIAS E. COLI”**, certifico que el total contenido del *Trabajo Experimental*, es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, octubre de 2021.

A handwritten signature in blue ink, reading "Luis Miguel", enclosed within a large, stylized blue oval.

Luis Miguel Espinoza Mora

C.I. 0106150352

## **DEDICATORIA**

Lo dedico a Dios sobre todo las cosas, por darme la paciencia, la sabiduría y sobre todo las fuerzas necesarias para poder afrontar los obstáculos de la vida. Mil gracias a la vida por darme una familia numerosa y muy unida.

Gracias a mis padres, en especial a mi madre por creer en mí a pesar de mis caídas, mil gracias por brindarme todo su amor y apoyo, ahora puedo decir que gracias a mis padres he podido estudiar y llegar a ser un profesional.

A mi tía por estar ahí, en los buenos y malos momentos de la vida, por haberme guiado y ser un apoyo fundamental en mi vida. Gracias por haberme enseñado que con dedicación y sacrificio se puede cumplir las metas que uno se imponga.

A mis hermanos por estar ahí en los momentos que uno más los necesita. Gracias por que me permiten guiarles en sus vidas. Los sueños no se consiguen de un día para el otro, para poder lograr lo que uno se propone en la vida hay que saber levantarse una y mil veces.

Gracias a toda la familia (abuelos, abuelas, tías, tíos, primos, primas, etc.) por siempre estar pendiente de mí, por haberme aconsejado para que yo sea una persona de bien. La importancia de la familia no es vivir juntos, si no es estar siempre unidos, apoyando en los buenos y malos momentos de la vida.

A mis amigos de escuela, de colegio y de la universidad, gracias por estar siempre pendiente de mí, por permitirme compartir los buenos y malos momentos de la vida.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi tutora de tesis, la Ing. Paola Duque, mi reconocimiento y mi agradecimiento por el aporte de sus conocimientos, sabiduría, así como de su tiempo otorgado en el desarrollo de mi trabajo de titulación.

A la Dr. Mónica Espadero, responsable del laboratorio "Ciencias de la Vida", le agradezco por estar siempre dispuesta en ayudar y brindar sus conocimientos para que mi trabajo de titulación se desarrolló con total normalidad.

Al Ing. Marlon Loayza, del laboratorio "Radioactividad –Toxicología", y a la Ing. Sandi del laboratorio "Ciencias de la Vida" gracias por ayudarme y facilitar todo el recurso (materiales, equipos, reactivos) necesario para que mi proyecto experimental avance según el cronograma establecido.

Gracias a los Docentes de la Universidad Politécnica Salesiana por brindarme sus conocimientos, me permitido desarrollarme profesionalmente a la vez que ha cambiado mi vida personal.

## Resumen

La escasez de agua limpia y la contaminación de este recurso con aguas residuales ha incentivado al ser humano en el desarrollo de nuevas tecnologías de desinfección con el fin de ayudar al planeta y proveer agua más limpia. El presente trabajo de investigación científica se enfoca en los procesos de desinfección ultravioleta, para lo cual se construyó un reactor UV de lámpara de baja presión de un solo paso, con el objetivo de estudiar el comportamiento de la cepa *Escherichia coli* ATCC 8739 a través del estudio de las cinéticas de inactivación mediante ensayos repetitivos y comparables con el reactor, así como el estudio de las cinéticas de reparación en oscuridad y fotorreactivación tras los tratamientos y su relación con la dosis. De acuerdo con los ensayos experimentales realizados se concluye que la bacteria certificada tiene una gran sensibilidad a la luz ultravioleta, mayor tiempo de exposición de la bacteria a la luz ultravioleta causa un elevado porcentaje de inactivación, no tiene la capacidad de reactivar en periodo de tiempo largos (5 días).

**Palabras clave:** Agua residual, reactor experimental UV, cepa certificada: *Escherichia coli*, dosis, desinfección, filtración en membrana, medios de cultivo, reactivación, recuento de colonias.

## Abstract

The scarcity the water clean and contamination of this resource with water residual to animated to human being in the development new technology disinfection with the purpose of help the planet and proveer cleaner water. The present working of investigation científica focuses in process of disinfection ultraviolet, it was built one reactor UV Of lamp of low pressure of one onely, with the objective of study the behavior of the strain *Escherichia coli* ATCC 8739 through of study of the kinetics of inactivation through tests repetitive and comparable with the reactor, as well as the study of the kinectics of reparation in obscurity and photoreactivation after of treatment and their relation with the dose. According to the tests experimental made it is concluded that the bacterium certified has a great sensitivity to light ultraviolet, highet time of exposure of the bacterium to the light ultraviolet cause higher porcent of inactivation, it does not have the ability to repair in periods of time long (5 days).

**Keywords:** Water contaminated, reactor UV experimental, certified strain: *Escherichia coli*, dose, disinfection, membrane filtration, medium of cultivation, reactivation, count of colony.

# CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I</b> .....	17
<b>1.1 Introducción</b> .....	17
<b>1.2 Antecedentes</b> .....	19
<b>1.3 Justificación</b> .....	21
<b>CAPÍTULO II</b> .....	24
<b>2 Objetivos del Proyecto</b> .....	24
<b>2.1 Objetivo General</b> .....	24
<b>2.2 Objetivo Específico</b> .....	24
<b>CAPÍTULO III</b> .....	24
<b>3. Fundamento Teórico</b> .....	24
<b>3.4 Diferentes orígenes</b> .....	25
<b>3.5 Composición del agua residual</b> .....	26
3.5.1 Características físicas.....	26
3.5.2 Características químicas.....	27
3.5.3 Características biológicas.....	29
<b>3.6 Escherichia coli</b> .....	30
3.6.1 Escherichia coli como indicador de contaminación fecal.....	31
3.6.2 Escherichia coli ATCC 8739 .....	32
<b>3.7 Tratamiento del agua residual</b> .....	32

<b>3.8 Enfermedades generadas por la contaminación del agua residual .....</b>	<b>33</b>
<b>3.9 Importancia del tratamiento del agua residual.....</b>	<b>34</b>
<b>3.10 Tecnología de desinfección ultravioleta .....</b>	<b>35</b>
<b>3.11 Luz ultravioleta (UV).....</b>	<b>36</b>
<b>3.12 Tipos de reactor ultravioleta.....</b>	<b>38</b>
3.12.1 Reactor de contacto.....	39
3.12.2 Reactor sin contacto.....	39
3.12.3 Reactor rayo colimado .....	39
3.12.4 Reactor tubular continuo.....	40
<b>3.13 Factores que afectan la eficacia de desinfección .....</b>	<b>41</b>
<b>3.14 Ventajas y desventajas al utilizar tecnologías de desinfección ultravioleta... 42</b>	<b>42</b>
<b>3.15 Activación del microorganismo .....</b>	<b>43</b>
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>44</b>
<b>4. Materiales y Métodos.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1 Descripción de la lámpara UV .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2 Información de los componentes de la lámpara.....</b>	<b>45</b>
<b>4.3 Configuración de la lámpara .....</b>	<b>46</b>
<b>4.4 Construcción del reactor UV .....</b>	<b>48</b>
<b>4.5 Agua residual utilizada.....</b>	<b>50</b>
<b>4.6 Filtración de agua residual.....</b>	<b>50</b>

<b>4.7 Parámetros bioquímicos del agua residual</b> .....	51
<b>4.8 Propagación de la bacteria certificada en agar nutritivo</b> .....	54
<b>4.9 Pruebas iniciales y ajustes hidráulicos</b> .....	55
4.9.1 Inyección de la cepa certificada y circulación del agua residual en el reactor	55
4.9.2 Recolección de la muestra .....	55
4.9.3 Medición del caudal en los ensayos experimentales.....	56
4.9.4 Cálculo de la longitud de la lámpara descubierta .....	57
4.9.5 Cálculo del radio externo de la funda de cuarzo.....	57
4.9.6 Cálculo de la dosis suministrada a diferentes caudales .....	58
<b>4.10 Preparación del medio de cultivo: Chromocult coliform agar</b> .....	58
<b>4.11 Disoluciones de las muestras de agua tratada</b> .....	60
<b>4.12 Técnica de filtración por membrana</b> .....	62
<b>4.13 Recuento de colonias</b> .....	64
<b>4.14 Ajuste de los datos experimentales mediante software GINAFIT</b> .....	64
<b>4.15 Reactivación de la cepa certificada Escherichia coli ATCC 8739</b> .....	65
4.15.1 Evaluación cuantitativa de fotorreactivación y reparación en oscuridad.....	67
<b>CAPÍTULO V</b> .....	69
<b>5. Resultados y Discusión</b> .....	69
<b>5.1 Análisis bioquímicos del agua residual</b> .....	69

<b>5.2 Resultados de los ensayos de inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739</b> .....	70
5.2.1 Ajuste de los datos a los modelos teóricos de inactivación bacteriana.....	80
<b>5.3 Resultados de la cinética de reactivación cepa Escherichia coli ATCC 8739..</b>	87
<b>CAPÍTULO VI</b> .....	92
<b>6. Conclusiones</b> .....	92
<b>CAPÍTULO VII</b> .....	93
<b>7. Recomendaciones</b> .....	93
<b>CAPÍTULO III</b> .....	94
<b>8. Bibliografías</b> .....	94
<b>CAPÍTULO IX</b> .....	107
<b>9. Anexos:</b> .....	107

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Valores máximos permitidos por la norma: INEN 1108. ....	29
<b>Tabla 2.</b> Especificaciones de las características del cuarzo y de la lámpara. ....	45
<b>Tabla 3.</b> Interpretación de las colonias que desarrollan en el medio de cultivo. ....	59
<b>Tabla 4.</b> Parámetros bioquímicos del agua residual. ....	69
<b>Tabla 5.</b> Ensayos experimentales realizados en el reactor UV de lámpara de baja presión. ....	70
<b>Tabla 6.</b> Inactivación de la cepa <i>Escherichia coli</i> ATCC 8739. ....	73
<b>Tabla 7.</b> Inactivación de la cepa <i>Escherichia coli</i> ATCC 8739. ....	73
<b>Tabla 8.</b> Inactivación de la cepa <i>Escherichia coli</i> ATCC 8739. ....	74
<b>Tabla 9.</b> Inactivación de la cepa <i>Escherichia coli</i> ATCC 8739. ....	74
<b>Tabla 10.</b> Inactivación de la cepa <i>Escherichia coli</i> ATCC 8739. ....	75
<b>Tabla 11.</b> Inactivación de la cepa <i>Escherichia coli</i> ATCC 8739. ....	75
<b>Tabla 12.</b> Inactivación de la cepa <i>Escherichia coli</i> ATCC 8739. ....	76
<b>Tabla 13.</b> Análisis de varianza de un factor. ....	79
<b>Tabla 14.</b> Análisis de varianza de los ensayos experimentales. ....	80
<b>Tabla 15.</b> Comparación de la bondad de ajuste obtenida para los modelos: Log-lineal clásico, Log-lineal + hombro y Bifásico ....	84
<b>Tabla 16.</b> Reactivación en oscuridad y fotorreactivación de la cepa <i>E. coli</i> ATCC 8739. ....	88
<b>Tabla 17.</b> Reactivación en oscuridad y fotorreactivación de la cepa <i>E. coli</i> ATCC 8739. ....	89
<b>Tabla 18.</b> Reactivación en oscuridad y fotorreactivación de la cepa <i>E. coli</i> ATCC 8739. ....	89

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Bacteria Escherichia coli. ....	30
<b>Figura 2.</b> Enfermedades transmitidas por el agua asociada agentes etiológicos. ....	34
<b>Figura 3.</b> Diferentes tipos de agua que puede tratar con la tecnología desinfección UV. ....	36
<b>Figura 4.</b> Espectro de luz UV y absorción del material genético del organismo. ....	37
<b>Figura 5.</b> Efecto de la radiación UV en el ADN. ....	38
<b>Figura 6.</b> La cantidad de disoluciones realizadas a las muestras de agua residual tratada. ....	61
<b>Figura 7.</b> Técnica de fotorreactivación y reactivación de la cepa Escherichia coli. ....	65

## Lista de Imágenes

<b>Imagen 1.</b> Lámpara UV de baja presión. ....	44
<b>Imagen 2.</b> Mediciones realizadas al tubo de vidrio y el cuarzo del reactor. ....	45
<b>Imagen 3.</b> Modificación de la lámpara UV de baja presión. ....	46
<b>Imagen 4.</b> Lámpara ultravioleta dentro del tubo de vidrio. ....	46
<b>Imagen 5.</b> Luz ultravioleta que emite la lámpara de baja presión. ....	47
<b>Imagen 6.</b> Cámara ultravioleta con el tubo de vidrio ....	47
<b>Imagen 7.</b> Recipiente de agua residual conectado a la bomba de agua. ....	48
<b>Imagen 8.</b> Bomba de agua conectado a la lámpara UV de baja presión ....	49
<b>Imagen 9.</b> Reactor experimental tubular UV de lámpara de baja presión. ....	49
<b>Imagen 10.</b> Planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba. ....	50
<b>Imagen 11.</b> Sistema de filtrado para retirar partículas presentes en el agua residual. ....	51
<b>Imagen 12.</b> Filtros de papel. ....	51
<b>Imagen 13.</b> Turbidímetro portátil. ....	52

<b>Imagen 14.</b> pH metro de mesa.....	53
<b>Imagen 15.</b> Espectrofotómetro UV. ....	54
<b>Imagen 16.</b> Cepa certificada de Escherichia coli ATCC 8739.....	54
<b>Imagen 17.</b> Recipientes estériles para las muestras del agua tratada. ....	56
<b>Imagen 18.</b> Probeta de 1 litro con agua tratada. ....	56
<b>Imagen 19.</b> Choromocult Coliform Agar. ....	59
<b>Imagen 20.</b> Cámara de flujo con medio de cultivo. ....	60
<b>Imagen 21.</b> Disoluciones de las muestras de agua tratada. ....	61
<b>Imagen 22.</b> Equipo de filtración por membrana.....	62
<b>Imagen 23.</b> Colocación de la membrana millipore en el sistema de filtrado. ....	63
<b>Imagen 24.</b> Estufa de secado. ....	63
<b>Imagen 25.</b> Contador de colonias.....	64
<b>Imagen 26.</b> Binder con muestras de agua tratada.....	66
<b>Imagen 27.</b> Crecimiento de colonias de bacterias en el medio de cultivo. ....	72
<b>Imagen 28.</b> Diferentes ensayos experimentales, crecimiento de colonias de bacterias E. coli. .....	72
<b>Imagen 29.</b> Frecuencia de inactivación de la Cepa E. coli en función logarítmica.....	76
<b>Imagen 30.</b> Frecuencia de inactivación de la Cepa E. coli en relación a la dosis UV. ....	77
<b>Imagen 31.</b> La media de inactivación de la cepa escherichia coli ATCC 8739.....	77
<b>Imagen 32.</b> Perfil de inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739. ....	78
<b>Imagen 33.</b> Los resultados de los ensayos experimentales ajustados a los 3 modelos de curvas. ....	81
<b>Imagen 34.</b> Representación de los 3 modelos de curvas en el programa GINAFIT. ....	82

<b>Imagen 35.</b> Perfil de inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739 representado en el modelo Log regresión lineal.....	82
<b>Imagen 36.</b> Perfil de inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739 representado en el modelo Log lineal + hombro.....	83
<b>Imagen 37.</b> Perfil de inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739 representado en el modelo bifásico. ....	83
<b>Imagen 38.</b> Fotorreactivación de la bacteria Escherichia coli ATCC 8739. ....	87
<b>Imagen 39.</b> Reactivación en oscuridad de la bacteria Escherichia coli ATCC 8739. ....	88

## **Abreviatura**

**FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

**ONU:** Organización Naciones Unidas.

**OPS:** Organización Panamericana Salud.

**OMS:** Organización Mundial de la Salud.

**USEPA:** Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

**INEN:** Instituto Ecuatoriano de Normalización.

**PTAR:** Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

**A.R:** Agua Residual.

**FTU:** Unidad de Turbidez de la Formazina.

**NTU:** Unidad Nefelométrica de Turbidez.

**TSB:** Agar liquido nutritivo ideal para el desarrollo de bacterias Escherichia coli.

**Hidro-UV:** Diseñador y fabricantes de equipos innovadores para tratamiento de aguas residuales.

**RMSE:** Raíz del error cuadro medio.

**F:** Prueba de Fisher.

**0sc:** Oscuridad

**S:** Porcentaje de supervivencia de la bacteria en el tiempo.

# CAPÍTULO I

## 1.1 Introducción

El agua se encuentra en todos los sistemas naturales, esencial para el desarrollo y la reproducción de la vida en el planeta, es el recurso natural más fundamental para la vida, es tan esencial para la humanidad y para el resto de los seres vivos, pero el calentamiento global y la contaminación ha provocado verdaderos problemas de salud pública.

El agua residual está compuesta de materia orgánica, virus, protozoarios, lombrices y bacterias como la *Escherichia coli*, la utilización del agua contaminada para riego agrícola ha aumentado enfermedades gastrointestinales como la cólera (Lorenzo et al. 2009).

El nulo o el mal manejo de aguas residuales pone el peligro los hábitats del planeta, esto persiste en menos porcentaje en países desarrollados y en mayor nivel en países en vías de desarrollo (Duque-Sarango and Chinchay-Rojas 2008).

La escasez de agua es uno de los principales problemas que enfrenta la población en el siglo XXI, la seguridad alimentaria depende del agua. El cambio climático, el aumento acelerado de la población, estándares de vida alta causara mayor escasez del líquido en el planeta, según la FAO si seguimos con los patrones de consumo actuales para el año 2025 dos tercios de la población mundial estarán sufriendo de escasez de agua (FAO 2017).

El agua un recurso cada vez más costoso y escaso, el consumo se ha incrementado de 1 % anual en todo el mundo desde los años 80 del siglo pasado, se espera siga aumentado a niveles parecidos hasta el año 2050, lo que representa un incremento del 20% a 30% por encima del nivel de consumo actuales (Chantal et al. 2019).

El ser humano en los últimos años ha experimentado escasez de agua fresca y limpia, actualmente muchos países del mundo ya sufren estas consecuencias, (Lorenzo et al. 2009). Ecuador posee abundante agua dulce, tiene una oferta hídrica con más de 26.000 m<sup>3</sup> por habitante al año, pero el mal manejo está provocando que se contamine o se desperdicie, el 90% de los municipios del país no tratan sus aguas residuales (Duque and Hernández 2020).

Un estudio realizado en Ecuador en el año 2016 demuestra que 32% de la población rural está expuesta a contraer E. coli y 15% zona urbana a causa de su fuente de agua, desafortunadamente, la utilización del agua de las fuentes desinfectadas no garantiza que el agua esté libre de contaminación fecal (Chantal et al. 2019).

El crecimiento de la población, el cambio climático y la contaminación ha provocado que el hombre invierta en nuevas herramientas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales, En la mayoría del mundo las plantas convencionales para el tratamiento de aguas residuales utilizan compuestos químicos como como el cloro, sin embargo, en los últimos años ha sido tema de discusión por los efectos secundarios que causa al ser humano el consumo (Aguirre, García, and Sahuquillo 2004).

Una alternativa para no utilizar el cloro es la tecnología de desinfección UV, que en los últimos años ha crecido su popularidad. Esta tecnología es muy poco utilizada en el tratamiento del agua residual por sus altos costos que genera su implementación, así como su mantenimiento (Hijnen, Beerendonk, and Medema 2006).

La diseminación y la innovación tecnológica puede conducir en el tiempo a una importante reducción de costos (Chantal et al. 2019). Muchos organismos como el Banco Mundial están considerando el agua residual como un recurso, asegura puede tratarse por diversos métodos para

logar diversas calidades, esto ayudara satisfacer la demanda, se puede utilizar en la industria, ganadería, agricultura, hasta para el consumo del ser humano (Rodriguez et al. 2014).

## **1.2 Antecedentes**

Las grandes civilizaciones se ubicaban en ambientes estratégicos, donde el agua sea accesible para todos, en la Revolución Industrial, sin duda la intervención del agua permitió el desarrollo económico, tecnológico y cultural de la humanidad, un claro ejemplo la máquina de vapor ayudo agilizar los trabajos que se realizaban a mano (González Perez 2017).

Se tiene evidencias que las civilizaciones antiguas desinfectaban el agua, en el año 2000 a C se declararon dos normas básicas, la primera norma decía que las aguas debía estar expuestas a la luz solar y la segunda expresaba que las aguas que tengas impurezas deben ser hervidas antes de cernir y almacenados en recipientes de plata (Pérez Castillo 2008).

El agua es indispensable para la vida, en la naturaleza el agua no es completamente pura tiene partículas orgánicas e inorgánicas debido al contacto con el ambiente (Brenes and Rojas 2005), posee un conjunto de propiedades que la hacen única, la ebullición es el método más antiguo y universal utilizado para desinfectar aguas a escala domiciliaria, logrando eliminar microorganismo presente en el agua (Véliz Ubilla 2014).

El cloro se emplea desde décadas para desinfectar aguas contaminadas, este compuesto ha sido utilizado con eficacia en las plantas de tratamiento convencionales de agua sin embargo con los avances el tratamiento del agua se ha determinado que la desinfección con ozono es rentable y resultará en agua de mejor calidad (González-Cabrera et al. 2014).

La aplicación de tecnología UV, tiene una larga historia, durante muchos años la radiación UV-A se empleaba para el cuidado de resinas. En el área de la salud, durante más de 100 años se ha utilizado la radiación UV-C para tratar enfermedades respiratorias altas como el control de la

tuberculosis, así mismo, la desinfección UV-C se emplea en la limpieza de conductos de sistemas de ventilación (Byrns et al. 2021).

En los años de guerra, en Europa la luz ultravioleta era utilizada para curar la deficiencia de vitamina D por la mala alimentación que eran sometidos las personas. En Inglaterra, los directores: Mansfield, Shoorwood Colliery, instalaron corredores de luz UV para superar la deficiencia de vitamina D que tenían las personas que trabajan en las minas subterráneas (Valdés Holguín 2018).

A lo largo de la historia la luz solar se empleado en diferentes actividades, Downs y Blunt en 1878 reportaron los primeros estudios de los efectos germicidas provocado por la luz sol. Las aplicaciones prácticas requieren investigación y desarrollo, en 1991 se utiliza la lámpara de vapor de mercurio como fuente de luz UV artificial y en 1905 se emplea el cuarzo como envoltura de la lámpara (López Torres 2005).

En Francia, Marsella en 1910, fue pionero en realizar ensayos experimentales con luz ultravioleta. En Estados Unidos, entre los años 1916 - 1926, la tecnología de desinfección UV se empleó para desinfectar agua y así proveer agua potable para el consumo de las personas que trabajan en los barcos de carga, sin embargo, los problemas operativos de los equipos, poca confiabilidad en la nueva tecnología y el bajo costo de desinfección del agua con cloro provoco que la tecnología de desinfección UV quede olvidada, retardando su avance, hasta las décadas de los 50 donde empezó de nuevo su desarrollo (López Torres 2005).

En 1970, las lámparas de mercurio empezaron a ser más confiable y el tiempo de duración era más prolongada, hoy en día, en Alemania una planta utiliza la luz ultravioleta para tratar un caudal no menos de un caudal de 329,000 m<sup>3</sup>/día, en Europa aproximadamente 2000 sistemas son desinfectados con luz ultravioleta (Pérez Castillo 2008).

Pérez en el año 2015 afirma que varios estudios más recientes llevados a cabo en la última década confirma que la luz ultravioleta tiene propiedades germicidas las cuales no generan compuestos tóxicos (Valdés Holguín 2018).

### **1.3 Justificación**

Todos los organismos, incluidos los seres humanos necesitan agua para sobrevivir. Por lo tanto, garantizar un suministro de agua adecuado es fundamental para el bienestar humano. Sin embargo, la falta de acceso a agua potable limpia es uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad en el siglo XXI (Chantal et al. 2019).

El consumo de agua contaminada con microorganismos patógenos aumenta el riesgo de enfermedades transmitidas, según la OMS, 2004; en todo el mundo hubo aproximadamente 2 millones de muertes por diarrea relacionadas con el agua y el saneamiento, lo que representa casi el 4% de la carga mundial de enfermedades (Montalvo-Ochoa et al. 2020).

Las ciudades generan grandes cantidades de aguas residuales que contienen niveles elevados de microorganismos que pueden ser causa y vehículo de contaminación al ambiente (Romero Martínez 2015).

Según las estimaciones de la FAO, alrededor del 30% de los recursos hídricos se encuentra en América Latina y el Caribe (Bretas et al. 2020), el 80% de la población se encuentra concentrado en las ciudades, y tan solo 30 % del agua residual recibe un tratamiento, el 70% no tienen ningún tratamiento evitando el reusó para riego, ganadería (Larios, González, and Morales 2015).

Los problemas causados no son sólo de carácter físico o estético, sino que trascienden al campo de la salud, ya que las comunidades humanas necesitan recurrir al recurso agua para su

abastecimiento, y si éstos están contaminados, pueden dar lugar a problemas epidemiológicos graves (Wright and Cairns 1996).

Los retos actuales que enfrentan las ciudades está en la escasez de agua para uso doméstico, industrial, agrícola, por eso es obligación de la sociedad reducir la contaminación y devolver a su cauce natural en la forma más cercana a su estado natural (Duque Sarango, Patiño, and Lopez 2019).

La urgencia de los países en desarrollo es de invertir, no solo en alcantarillado, sino en el tratamiento de aguas residuales, según Birguy Lamizana especialista de la ONU en temas ambientales, advierte que construir más alcantarillado sin el respectivo tratamiento no soluciona nada, mejor empeora la contaminación en ríos (ONU 2019).

La mayoría de plantas de tratamiento a nivel mundial utilizan cloro como desinfectante por su simplicidad de aplicación y bajo costo. Sin embargo, este proceso tiene la desventaja de generar productos secundarios denominados organoclorados que se consideran carcinógenos (Beltrán and Jiménez 2000).

A pesar que el hipoclorito es sumamente económico en relación a otros desinfectantes. Una investigación llevada a cabo por la Organización Mundial de la Salud, realizado en el año 2011, afirma que el cloro provoca efectos negativos al ambiente y dañinos a la salud de las personas. Un 93 % de las personas que están expuesta al químico puede desarrollar el riesgo obtener cáncer (Valdés Holguín 2018).

El objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo del Milenio señala: “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos” (UNICEF 2017), la

idea es de tener agua segura para beber, con ello el ser humano se ve en la necesidad del uso de nuevas tecnologías que sean más amigables con el ambiente .

La nueva tecnología de desinfección ultravioleta está basando en la desactivación o destrucción de los microorganismos patógenos presentes en el agua contaminada, esta tecnología no genera efectos secundarios como la tecnología tradicional que utiliza el cloro como desinfectante.

La eficacia de la tecnología UV está bien establecida para desactivar varios patógenos que incluyen bacterias, parásitos protozoarios y virus (Abbaszadegan et al. 1997), sin embargo algunos microorganismo como las bacterias tienen la capacidad fotorepararse después de haber recibido irradiación UV, afectando en los resultados finales y poniendo en riesgos a la salud de la población.

La utilización de la tecnología de desinfección UV en procesos de tratamiento de aguas residuales es poco conocida en América Latina, hay algunos estudios realizados en relación al tema, por tal motivo, la presente investigación está enfocada en la construcción de un pequeño reactor experimental UV de lámpara de baja presión de un solo paso para tratar aguas residuales locales, mediante la aplicación de diferentes dosis se estudiara la eficacia de la desactivación de la cepa *Escherichia coli*, así como la capacidad de la cepa en fotorepararse y repararse en oscuridad en periodo de tiempo de 5 días.

## CAPÍTULO II

### 2 Objetivos del Proyecto

#### 2.1 Objetivo General

Evaluar el funcionamiento y rendimiento del reactor tubular UV de un solo paso en los procesos de desinfección de microorganismos *E. coli* 8739 presentes en el agua y posterior estudio de reactivación.

#### 2.2 Objetivo Específico

- Construir el reactor inicial de experimentación a nivel de laboratorio para ensayar en condiciones de desinfección UV en microorganismos presentes en agua residual.
- Estudiar del comportamiento de *E. coli* 8739 contenidas en efluentes de aguas residuales; estudio de la cinética de inactivación en aguas residuales, ensayos de ajuste inicial y condiciones hidráulicas.
- Estudiar las cinéticas de reactivación tras los tratamientos y su relación con la dosis UV de *E. coli* 8739.

## CAPÍTULO III

### 3. Fundamento Teórico

Actualmente el agua es considerada uno de los recursos naturales que forma parte del desarrollo de cualquier país; es el compuesto químico indispensable para el desarrollo de la vida, en los últimos años este recurso se ha visto afectado debido a su contaminación, lo cual representa un desequilibrio social, económico y ambiental (Esponda Aguilar 2001).

En el planeta tierra el agua circula constantemente, es de gran importancia para la vida en la tierra, la protección y conservación implica una acción positiva para mantener la calidad del agua y asegurar un mejor bienestar para las futuras generaciones (Leon et al. 2018).

La desinfección del agua se entiende como la inactivación, destrucción e eliminación de microorganismos patógenos presentes en el mismo (Pérez Castillo 2008). El consumo de agua limpia es ideal para tener una vida sana, una gestión adecuada permite un desarrollo económico y social sostenible (Rossel et al. 2014).

### **3.3 Definición de aguas residuales**

Son aquellas aguas desechadas que es producto de las diferentes actividades que el ser humano realizada, si no son tratadas correctamente o no tienen ningún tratamiento representa un riesgo en la salud humana y en el medio ambiente (Espigares and Pérez 1985).

Siempre el agua contaminada va tener alteradas sus características químicas, físicas, biológicas, su composición afecta la potabilidad diaria, agua tratada correctamente permitirá la reutilización en actividades domésticas, industriales o agrícolas (Monroy and Durán de Bazúa 2006).

### **3.4 Diferentes orígenes**

Las aguas residuales proceden de distintos orígenes, a continuación, su clasificación:

**Aguas residuales domésticas.** – procede de las actividades doméstica como de la limpieza de la casa, del aseo personal etc., contiene una gran cantidad de materia orgánica, microorganismo, así como resto de jabones, detergentes, grasas producto de las heces y de orina humana (Espigares and Pérez 1985).

**Aguas residuales industriales.** - generado de la actividad industrial, contiene aceites, ácidos, antibióticos, grasas y otros elementos de origen animal y químico. Sus características físico químicas, biológicas depende de su actividad industrial (Espigares and Pérez 1985).

**Aguas residuales blancas.** – menos carga contaminante, procede de la limpieza de parques, calles, mercados, negocios y otros espacios públicos o de procedencia atmosférica (hielo, nieve, lluvia) (Espigares and Pérez 1985).

**Agua residual agrícola.** - es producto de actividad agrícola en zonas rurales, el uso excesivo de químicos en la producción agrícola está causando pérdida de biodiversidad, mayor complejidad a hora de realizar un tratamiento (Espigares and Pérez 1985).

En la mayoría de lugares tienen un sistema de alcantarillado de tipo unitario, este sistema se encarga de recoger aguas residuales domésticas e industriales, así como aguas residuales blancas, es menos costoso su implementación en relación a otras redes de alcantarillado (CENTA 2008).

### **3.5 Composición del agua residual**

La composición del agua residual varía dependiendo de los diferentes factores que lo afecta, entre esto se encuentra la cantidad de agua que consume el habitante por día y los diferentes hábitos alimenticios de la población (Ricardo 2002).

#### **3.5.1 Características físicas**

**Color:** Una agua residual doméstica e industrial fresca se presenta de color gris claro, mientras de color negro o gris oscuro, se considera un agua en estado séptico (Espinoza and Zumba 2018). El color tiene propiedades organolépticas que se ve afectado por el material disuelto, suspendido o coloidal presente en el agua residual, en cuerpos de agua residual las sustancias suspendidas dan el color aparente, mientras que el color verdadero es producto de sustancias disueltas (Martínez and Osorio 2018).

**Olor:** El olor depende de la descomposición de la materia orgánica, el agua residual fresca tiene un olor relativamente agradable, mientras que un olor muy desagradable se encuentra en un agua séptica (Espinoza and Zumba 2018).

**Temperatura:** La temperatura del agua residual oscila entre un rango de 10 a 20 °C, teniendo una influencia en la actividad microbiana (Wiki 2007), es responsable de los fuertes olores que proviene de una agua contaminada (Espinoza and Zumba 2018).

**Turbiedad:** son aquellas aguas que contienen una gran cantidad de partículas, el grado de transparencia depende de la cantidad de materias en suspensión (limo, materia orgánica, microorganismo), las aguas residuales poseen altos niveles de turbiedad (Espigares and Pérez 1985).

### 3.5.2 Características químicas

Las características químicas más importantes que se debe tener en cuenta es: la materia orgánica, materia inorgánica y los gases, en general el agua residual está constituida de 99,9% de agua y el resto de materia sólida (Ricardo 2002).

La materia orgánica está constituida de proteínas (40-60%), carbohidratos (25-50%), grasas y aceites (10%) (Espigares and Pérez 1985). Además de contener materia orgánica y materia en suspensión, contiene otros compuestos como fosforo, amoníaco, cloruros, detergentes. La urea es otro compuesto químico que se encuentra en el agua residual. A continuación, los principales parámetros que deben ser evaluados para verificar la calidad del agua residual:

**Sólidos suspendidos totales:** Partículas orgánicas e inorgánicas que se encuentra separado del agua residual, se puede separar mediante el método de filtración, sedimentación o centrifugación (Ricardo 2002).

**Demanda química de oxígeno:** Mide la cantidad de oxígeno necesario para la destrucción (oxidación química) de la materia orgánica (Ricardo 2002).

**Demanda bioquímica de oxígeno en cinco días:** Mide la cantidad de oxígeno necesario para degradar biológicamente materia orgánica a una temperatura de 20°C (Ricardo 2002).

**Contenido de nutrientes:** El fósforo y nitrógeno son dos nutrientes elementales que necesitan las plantas para crecer, se encuentran presentes en el agua residual (Ricardo 2002).

**Contenido de gérmenes:** La presencia de microorganismos como: *Escherichia coli*, *Enterococcus*, amebas, coliformes fecal, etc., permite evaluar el peligro para la salud pública (Ricardo 2002).

**Metales pesados:** La presencia de metales pesados en el agua residual como: Arsenio, mercurio, aluminio, Arsenio, cobre, etc., permite determinar la complejidad del tratamiento (Ricardo 2002).

**pH.** - Es una característica química que mide la cantidad de acidez o alcalinidad de una sustancia o solución. El pH del agua limpia está en un rango de 7, mientras el agua de lluvia entre los rangos de 5,5 -5.7(Osorio 2012).

**Conductividad:** Es el parámetro que mide la capacidad del agua en transportar corriente eléctrica, las sales disueltas en el agua generan iones capaces de permitir transportar energía eléctrica, a temperaturas altas se produce mayor conductividad eléctrica (Solís, Zúñiga, and Mora 2018).

**Transmitancia.** - Es la propiedad que mide la capacidad que tiene el agua en dejar pasar la luz, como la luz UV en un determinado tiempo. Los sólidos suspendidos, los compuestos orgánicos e inorgánicos disminuye la transmitancia presente en una agua residual, en un agua

desionizada la longitud de onda es de 254 nm dando una transmitancia de 100 % (Rossel et al. 2014).

Para los ensayos físico químicos, la Norma Ecuatoriana: INEN 1108, establece los siguientes parámetros para que un agua sea apta para consumo humano, (Lema, Morales, and Rosales 2015), en la tabla 1 se encuentra detallado.

**Tabla 1.** Valores máximos permitidos por la norma: INEN 1108.

<b>Parámetro</b>	<b>Valores Permitidos</b>
Turbidez	5 NTU
pH	6,5 - 8,5
Color	15
Temperatura	18 – 30 ° C
Conductividad	600 us/cm
Dureza	300 mg/l-CaCO <sub>3</sub>
Alcalinidad	30 - 300 mg/l-CaCO <sub>3</sub>
Calcio	100 – 250 mg/l
Hierro	0,1 - 0,2 mg/l
Magnesio	30 – 60 mg/l
Sulfatos	200 mg/l
Sólidos totales disueltos	1000 mg/l

**Fuente:** (Lema, Morales, and Rosales 2015).

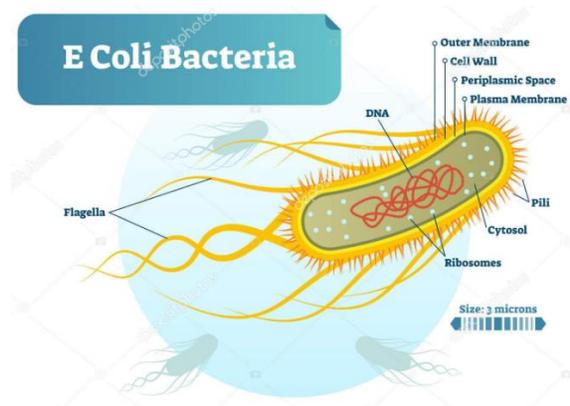
### 3.5.3 Características biológicas

Dependiendo de su composición y concentración puede tener una gran cantidad de microorganismo, como las bacterias: (Escherichia coli, Salmonella, Estreptococos fecales, Proteus, Pseudomonos) de origen fecal (Espigares and Pérez 1985).

En el agua residual también se puede encontrar protozoos, hongos, virus, por ejemplo, un gramo de heces de una persona enferma existe entre  $10^5$  -  $10^6$  dosis infecciosa del virus de la hepatitis (Wiki 2007):

### 3.6 Escherichia coli

Escherichia coli es considerada una bacteria gran negativa, pertenece a la familia Enterobacteriaceae, bacteria mesófila, puede llegar a medir entre 1 hasta 3 micras, se mueve a través de flagelos, necesita de una temperatura de 35 a 43 °C para su desarrollo óptico y su límite de crecimiento se sitúa a una temperatura de 7 °C, este bacilo puede fermentar lactosa y glucosa produciendo gas (Benvenuto Vargas 2017). Puede colonizar el organismo en pocas horas de haber nacido, esto se considera como una flora natural (Rodríguez-Angeles 2002), pero hay cepas que son peligrosas para el ser humano, produce algunas enfermedades como la diarrea, pero la mayoría de las bacterias E. coli no causan problemas (Ver la figura 1).



**Figura 1.** Bacteria Escherichia coli.

**Fuente:** (Mine n.d.).

Fue descubierta por el bacteriólogo Alemán Theodore Escherich en el año de 1885, anteriormente se conocía con el nombre de “Bacterium coli commune”, se encuentra presente en el tubo intestinal de los animales de sangre caliente y en los seres humanos, se considera como flora normal, también se puede encontrar en el ambiente y en los alimentos (Croxen et al. 2013).

El pH del agua puede influir en la proliferación de la bacteria E. coli, un pH óptico para su desarrollo es de 0,99 a 7,2 respectivamente, la bacteria se detiene a pH superiores de 9,5 e inferiores de 0,94 (Rodríguez-Angeles 2002). Otra característica de la bacteria E coli pueden ser vector de algunas enfermedades, pero es mucho más sensible a la desinfección que los protozoos y virus entéricos (Benvenuto Vargas 2017).

Antes de aparezca el coronavirus, es posible que la bacteria E coli era la más estudiada, se tiene información genética, fisiológica y bioquímica, en 1991 se describió el primer sistema de regulación genética, mientras que los primeros ensayos proteoma datan se realizaron en el año 1980, actualmente se cuenta con información más completa y detallada de la función y regulación de muchos de sus genes, Tiene la facilidad de colonizar nuevos ambientes, pero las condiciones del ambiente como presencia de luz limitan o impiden su desarrollo (Ramírez Santos, Contreras Ferrat, and Gómez Eichelmann 2005).

### **3.6.1 Escherichia coli como indicador de contaminación fecal**

No existe un microorganismo indicador ideal que se ajuste a todos los criterios, pero existen algunos que responden a muchos de esos puntos de vista, entre los que se destacan es la Escherichia coli (Rompre et al, 2010). Estos microorganismos se utilizan como indicadores de desinfección, pero los análisis son mucho más lentos y menos fiables que la medición directa de la concentración residual de desinfectante (Godoy Sierra 2015).

La Escherichia coli, es uno de los principales patógenos bacterianos encontrados en agua contaminada o en agua residual, es considerada como microorganismo de contaminación fecal por excelencia (Romeu Alvarez 2012).

### **3.6.2 Escherichia coli ATCC 8739**

Es una cepa modelo utilizado frecuentemente en pruebas de laboratorio, el nombre científico es *Escherichia coli* (Migula) Castellani y Chalmers, tiene una clasificación: Enterobacteriaceae *Escherichia*, está diseñado exclusivamente para investigación, tiene la capacidad de desarrollarse rápidamente (ATCC 2013).

Para su desarrollo necesita de un medio nutritivo (agar nutritivo o caldo nutritivo), crece a una temperatura de 37 °C, en un ambiente aeróbico, durante 24 horas, la bacteria es obtenida del aislamiento de las heces. Las condiciones de almacenamiento de la bacteria; congelado: -80 ° C o más frío y liofilizado: 2 ° C a 8 ° C (ATCC 2013).

### **3.7 Tratamiento del agua residual**

Según el Banco Mundial (2003), en América Latina tan solo el 30% de aguas residuales reciben un tratamiento y un 70% no reciben ningún tratamiento que desemboca directamente al ambiente (Malpartida Campos 2020).

En países América latina, especialmente en el Ecuador existe leyes sanitarias y entidades reguladoras encargadas de regular, a pesar de tener estos mecanismos beneficios con el tiempo se ha observado una inadecuada gestión (Malpartida Campos 2020).

La OMS en el año de 1989 establece un límite de 100 unidades formadoras de colonias de coliforme fecales en 100 ml de muestra (Aguirre, García, and Sahuquillo 2004). La universidad de Vermont sugiere que el agua para riego no debe tener más 200 UFC/100ml de agua, en caso de coliforme fecales totales deben tener no más de 77 UFC/100ml de Coli (Enriquez et al. 2011).

Una investigación en Kansas sugiere los siguientes valores en relación a la calidad de agua, para consumo humano el agua debe tener cero de *E coli* y cero de coliforme totales, para recreación

sin contacto el agua debe tener menos de 2000 UFC coliforme totales y 200 UFC de colonias E coli (Enriquez et al. 2011).

### **3.8 Enfermedades generadas por la contaminación del agua residual**

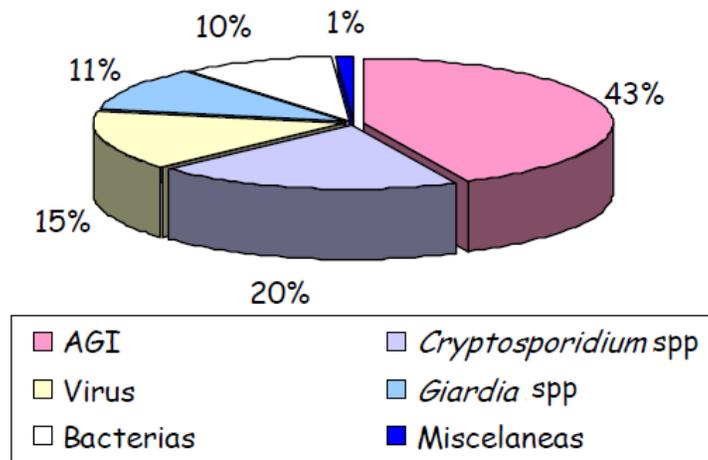
Según la OPS, en América latina millones de personas carecen de una fuente adecuada de agua potable, las enfermedades más comunes por consumir agua contaminada son: diarrea, infecciones gastrointestinales y urinarias, entre otras. En la región mueren aproximadamente 7600 niños menores de 5 años por enfermedades diarreicas (OPS 2021), por falta de saneamiento e higiene la ONU afirma que cada año mueren aproximadamente 842000 personas (Montalvo-Ochoa et al. 2020).

Un estudio demuestra que las aguas residuales generan diferentes epidemias como el síndrome de Guillain Barré, el cólera, Hepatitis viral A y enfermedades infecciosas que son transmitidas por insectos como el dengue, zika, chikungunya y fiebre amarilla (Malpartida Campos 2020).

En países en vías de desarrollo el consumo de agua contaminado ha generado diversas enfermedades, siendo la más común las enfermedades gastrointestinales, según la Organización Mundial de la salud en el año 2015 la bacteria E coli causa el 40% de diarrea en niños menores a cinco años (León et al. 2018).

En el Ecuador, muchas de las enfermedades gastrointestinales están relacionado a las aguas servidas que son vertidas directamente a los ríos sin previo tratamiento. En el año 2016 según el Ministerio de Salud Pública de Ecuador, en Guayas por cada 100000 habitantes se presentaron las siguientes infecciones gastrointestinales: 3033 enfermedades diarreicas, 1206 de Shigelosis, 90 de Síndrome Diarreico Agudo con deshidratación y 9 de Salmonelosis (León et al. 2018).

Muchas enfermedades están relacionadas a una bacteria o un microorganismo conocido, pero hay otras enfermedades agrupadas en una nueva categoría de enfermedades transmitidas por el agua de etiología no conocida como la AGI “Gastroenteritis aguda de etiología no conocida, ver la figura 2 (Córdoba, Del Coco, and Basualdo 2010).



**Figura 2.** Enfermedades transmitidas por el agua asociada agentes etiológicos.  
Fuente: (Córdoba, Del Coco, and Basualdo 2010).

### 3.9 Importancia del tratamiento del agua residual

En países desarrollados e industrializados los problemas de escasez de agua, de su contaminación y los impactos generados por el uso inadecuado se ha manifestado más temprano, las cuales se ha generado programas de control, conservación y uso más eficiente, a principios del año 20 en Estados Unidos empezó el reusó del agua tratada en la agricultura (Escalante et al. 2003).

Actualmente se considera un recurso valioso a la reutilización del agua residual tratada (Escalante et al. 2003), en los últimos años se ha incrementado el reusó del agua residual tratada en países desarrollados y en vías de desarrollo (Manga, Logreira, and Serralt 2001). Existe cuatro razones que justifican el tratamiento de las aguas residuales, estos puntos son: (a) Razones de salud pública. (b) Razones económicas. (c) Razones estéticas. (d) Razones legales (Ricardo 2002).

Una de las alternativas para tratar de aliviar en parte la falta de agua, es aprovechar el agua residual para riego agrícola, generada tanto por la población urbana, como por las industrias, sin embargo, son pocos los estudios relacionados con la calidad sanitaria y productividad agrícola de tales recursos hídricos (Guadarrama Brito and Galván Fernández 2015).

La reutilización del agua residual tratada presenta dos ventajas importantes: (a) Aumenta la cantidad de agua disponible y (b) disminuye el nivel de contaminación ambiental (Cerdá et al. 1993).

Para el año 2030, poner fin a las enfermedades transmitidas por el agua, es uno de los objetivos planteado por la Organización de las Naciones Unidas, en relación al ambiente (ONU 2019).

Para proteger el recurso agua, durante décadas el ser humano a edificado miles de estaciones de tratamiento de agua residuales (Asensi et al. 2019). Existe diversos métodos para desinfectar aguas residuales, las más comunes son: cloro, la luz ultravioleta y el ozono. El cloro es el más utilizado actualmente, sin embargo en los últimos años el ozono y la luz ultravioleta han ganado espacio como medios de desinfección (Tarrán 2006).

### **3.10 Tecnología de desinfección ultravioleta**

La desinfección ultravioleta es una alternativa establecida para la purificación del agua, agua residual y de aguas industriales de diferentes calidades. En Estados Unidos la tecnología de desinfección UV es muy popular, es usada para desinfectar más de 6.4 % de pozos de todo el sistema. En Reino Unido, las plantas de tratamiento de aguas residuales para la desinfección primaria, combinan el cloro con la tecnología de desinfección UV, usan ambas tecnologías de lámparas de mediana y baja presión (Wright and Cairns 1996).

Se ha estudiado y comprobado que la tecnología de desinfección UV es eficiente en la inactivación e eliminación de bacterias (escherichia coli, enterococcus), virus (virus de hepatitis A, colifago, rotavirus y polivirus) y protozoarios (Guimarães et al. 2001).

<u>Aqua Potable</u>	<u>Comercial</u>
Municipal	Criaderos de Peces
Comunal	Hidrocultivos
Subdivisiones	Laboratorios
Campos de casas rodantes	Acuarios
Terrenos para acampar	Restaurantes
Alojamientos de caza	
Campos de Esquí	<u>Industrial</u>
Hoteles	Cervecerías
Barcos	Farmacéutica
Institucional	Embotelladoras
Hospitales	Electrónica
Escuelas	Conservas
Asilos de ancianos	Productos Lácteos
Centros Comunales	Alimentos
Residencias	Productos Marinos
	Destilerías
<u>Aguas Residuales</u>	Petróleo
Municipales	Textiles
Comunales	Cosméticos
Institucionales	Imprenta
Residenciales	

**Figura 3.** Diferentes tipos de agua que puede tratar con la tecnología desinfección UV.

**Fuente:** (Wright and Cairns 1996).

Los sistemas de desinfección ultravioleta pueden ser diseñadas para tratar diferentes tipos de aguas, (Ver la figura 3), pero siempre hay que tener en cuenta la característica de agua siendo desinfectada y los objetivos que se quiere lograr con el tratamiento (Wright and Cairns 1996).

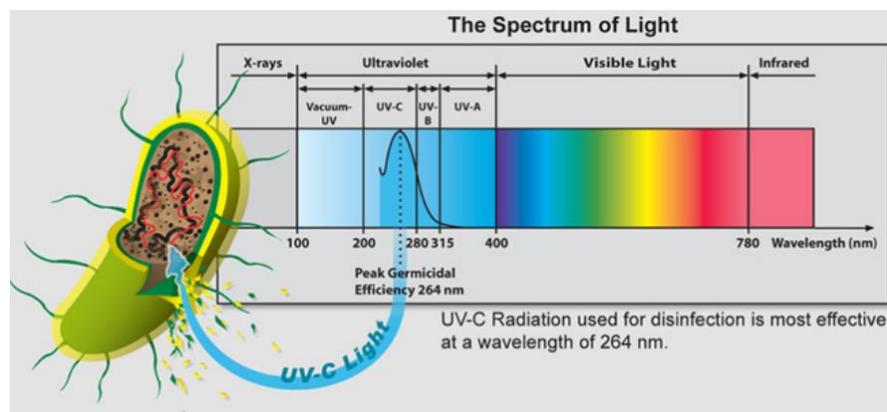
### 3.11 Luz ultravioleta (UV)

El sol es fuente de energía ultravioleta, las capas atmosféricas de la tierra impiden que cantidades significativas de UV-B y UV-C lleguen a la superficie, por esta razón las aplicaciones prácticas de desinfección dependen de fuentes artificiales como las lámparas de mercurio (Wright and Cairns 1996).

Existe 3 tipos de lámparas: lámparas de mercurio de baja presión, lámparas de mercurio de media presión y lámparas de mercurio de alta presión (Tarrán 2006). Las lámparas de baja presión

son más eficientes que la lámpara de media presión, aproximadamente el 40 % de la energía eléctrica generado por lámpara de mercurio de baja presión de la marca Aquafine transforma en energía UV-C en una longitud de onda de 254 nm, alto poder germicida (Trojan Technologies 2020).

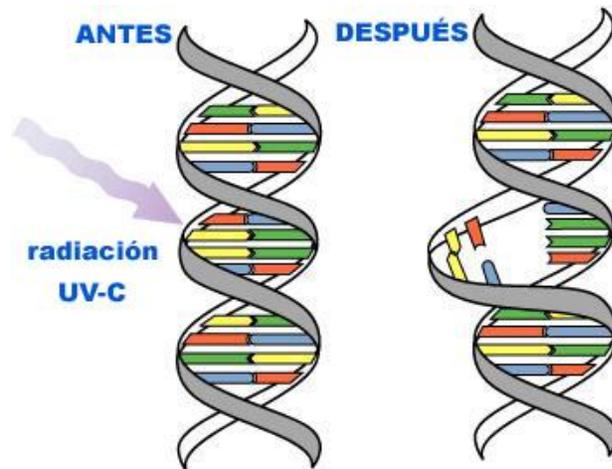
La luz UV es el mecanismo más eficaz para la desactivación o destrucción de los organismos patógenos presentes el agua, no produce subproductos (Wright and Cairns 1996), se ha dividido en cuatro bandas: Vacío UV (100 a 200) nm, UV-C (200 a 280) nm, UV-B (280 a 315) nm, y UVA (315 a 400) nm. La banda UV-C del espectro de la luz es capaz de dañar la estructura del ADN de las bacterias y virus, se inactiva e impide que el microorganismo reproduzca (Trojan Technologies 2020).(Ver la figura 4).



**Figura 4.** Espectro de luz UV y absorción del material genético del organismo.

**Fuente:** (Chris 2015).

El principal efecto de la radiación ultravioleta en los microbios es la inactivación debido a las alteraciones de los ácidos nucleicos por el efecto del daño fotoquímico que se genera (Romeo Calderón 2014). (Ver la figura 5).



**Figura 5.** Efecto de la radiación UV en el ADN.  
**Fuente:** (Josep 2009).

Toda célula viva tiene ADN (ácido desoxirribonucleico), contiene instrucciones genéticas, debe estar intacto para un correcto funcionamiento. Una de las propiedades internas presente en las moléculas del microorganismo es la capacidad del ADN en absorber radiación ultravioleta, causando el principal efecto de rompimiento de las cadenas de aminoácidos, evitando la formación y reproducción de nuevas colonias y eliminando sus propiedades para producir enfermedades, logrando así la inactivación del microorganismo (López Torres 2005).

La inactivación del microorganismo está en función a la longitud de onda, para la inactivación de la bacteria *Escherichia coli* depende del espectro, debe alcanzar una longitud de ondas cercas de 265 nm y 220 nm, es recomendable que la lámpara de baja presión a 254 nm alcance su punto máximo de inactivación cerca de 254 nm (Romeo Calderón 2014).

### **3.12 Tipos de reactor ultravioleta**

Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (1999), dice que existen dos tipos de configuraciones de reactores para el sistema de desinfección con luz (Romeo Calderón 2014). A continuación, los dos tipos de reactores:

### 3.12.1 Reactor de contacto

Está constituido de una lámpara de mercurio que está cubierto con mangas de cuarzo, este sistema reduce el tiempo de enfriamiento cuando la lámpara está sumergida en el agua (Herdiana 2010).

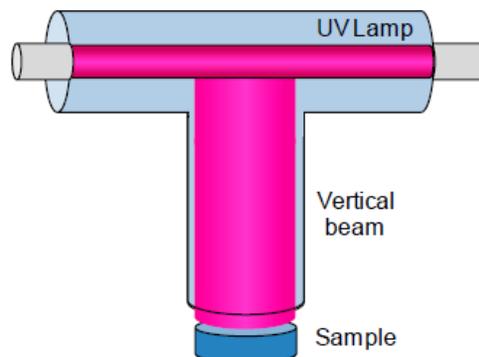
### 3.12.2 Reactor sin contacto

Está constituido de una lámpara UV que se encuentra suspendida en el conducto transparente del sistema, la lámpara nunca entra en contacto con el agua residual. En ambos casos, el agua residual puede fluir en forma perpendicular o paralela a las lámparas (Herdiana 2010).

En los últimos años la tecnología de desinfección UV se ha renovado, es bien conocido que dicha tecnología se emplea para desinfectar agua potable, poco estudiada en tratar aguas residuales, actualmente se emplea en nuevos campos, por ejemplo, para tratar aguas lastres. A continuación, los otros tipos de reactores:

### 3.12.3 Reactor rayo colimado

Está diseñado para tratar volúmenes muy pequeños de agua de una manera discontinua, es un sistema controlado, permite que los microbios reciban una dosis similar al valor teórico, especialmente si la muestra se agita lentamente. (Romero Martínez 2015).



**Figura 6.** Estructura de un reactor ultravioleta de rayo colimado.

**Fuente:** (Romero Martínez 2015).

Está constituido de una lámpara UV-C de mercurio de baja presión que tiene una potencia de 10 W, colocada dentro de un cilindro de PVC que tiene una abertura de 5cm de diámetro (Ver la figura 6). A lado de la lámpara de mercurio se encuentra un sistema de bombeo que evita el sobrecalentamiento al sistema. (Romero Martínez 2015).

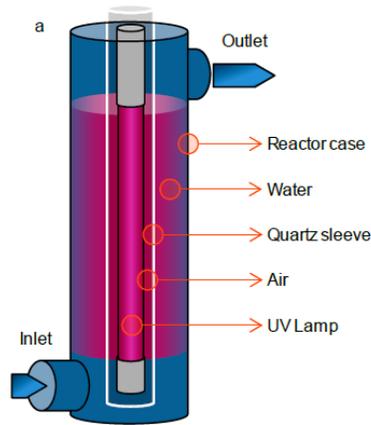
La USEPA recomienda que el tiempo mínimo de exposición del microorganismo en el reactor UV de rayo colimado debe ser de 5 segundos, si el tiempo de exposición aumenta se aumenta la dosis UV recibida. La inactivación dosis va depender de la cantidad de dosis de radiación recibida, pero para el cálculo hay que tener en cuenta los siguientes factores que afecta el haz colimado como la distancia de la lámpara UV, la reflectancia de la interfase aire-agua, etc. (Romero Martínez 2015).

#### **3.12.4 Reactor tubular continuo**

Este tipo de reactor es ideal para el tratamiento de bacterias y algas, está compuesta de una carcasa cilíndrica en cuyo interior se encuentra una funda de cuarzo y una lámpara de baja presión de Hg (Ver la figura 7). La lámpara debe tener una potencia de 40w, que emita una luz ultravioleta de 254 nm. (Romero Martínez 2015).

El agua contaminada se bombea a través de reactor tubular de un solo paso, y la velocidad del caudal se regula con válvulas para poder determinar el tiempo de exposición para poder determinar la dosis recibida en cada momento (Romero Martínez 2015).

La eficacia del sistema de desinfección con luz ultravioleta depende de las características del agua residual, la intensidad de la radiación, el tiempo de exposición de los microorganismos a la radiación y la configuración del reactor (Ramírez Arias 2013).



**Figura 7.** Componentes de un reactor tubular de un solo paso.  
**Fuente:** (Romero Martínez 2015).

### 3.13 Factores que afectan la eficacia de desinfección

Diversas investigaciones demuestran que la luz UV tiene menor eficiencia de inactivación en virus en relación a las bacterias, es decir los virus son más resistentes a la luz UV que las bacterias (Aguirre, García, and Sahuquillo 2004).

Tarrán (2006), cita los siguientes factores que afecta el grado de eficacia en la desinfección del agua:

- Calidad del agua a tratar.
- Solidos suspendidos presentes en el agua tratar.
- Tratamiento previo del agua antes de aplicar luz ultravioleta
- Características de la lámpara.
- Tiempo de uso de la lámpara.
- Limpieza del tubo de lámpara y el cuarzo.
- Diseño del reactor UV.

Estudios recientes realizados por los científicos: Manzanares (2000) y Fernández (2000) llevados a cabo en efluentes en dos plantas convencionales de agua residual, sin tratamiento previo, para verificar el grado de eficiencia utilizaron el mismo sistema de desinfección de luz UV de media presión, los resultados revelan diferencias significativas entre los dos efluentes en relación a la inactivación de la bacteria, confirmando que en los procesos de desinfección la luz ultravioleta tiene gran dependencia de las características del efluente y de la transmitancia (Guimarães et al. 2001).

### **3.14 Ventajas y desventajas al utilizar tecnologías de desinfección ultravioleta**

#### **Ventajas**

- El proceso de desinfección UV permite desactivar la mayoría de virus, esporas, quistes y requiere un periodo de tiempo más corto en comparación con otros desinfectantes (Romeo Calderón 2014).
- No genera subproductos que puede afectar al ser humano o cualquier otro organismo acuático (Romeo Calderón 2014).
- Reducción de costos de mantenimiento, muy simple el mantenimiento y reemplazo anual de la lámpara, la limpieza del cuarzo cuando es necesario (Tarrán 2006).
- Necesita poco espacio, en comparación a otras tecnologías utilizadas para tratar aguas contaminadas (Romeo Calderón 2014).

#### **Desventaja**

- Algunos microorganismos tienen la característica de desactivar los efectos destructivos de luz ultravioleta mediante un mecanismo de reparación conocido como “fotorreactivación, esta tecnología en relación a la tecnología de desinfección con cloro no es tan económica (Romeo Calderón 2014).

- En el agua residual está presente sólidos suspendidos totales y turbidez que provocan la desinfección UV sea ineficaz (Romeo Calderón 2014).

### **3.15 Activación del microorganismo**

Los virus no tienen el mecanismo de repararse, en cambio, las bacterias y otros microbios tienen la habilidad de reparar los ácidos nucleicos dañados, este mecanismo de reparación se conoce como fotorreactivación. La fotorreactivación está relacionado directamente con el daño causado a los ácidos nucleicos por la exposición de la luz UV. Según Groocock (1984) para alcanzar la fotorreactivación debe ocurrir una exposición de luz entre 300 y 500nm dentro de dos a tres horas con un pH y temperatura de agua (Romeo Calderón 2014).

La luz UV-B causa lesiones en dímeros pirimidínicos de ciclobutano, en la bacteria *Escherichia coli* el primer elemento en ser identificado para la fotorreactivación es la proteína de 49 kDA, encargada de absorber cerca de 90% de luz visible (Estrada Ramirez, Corona Bautista, and Pedraza Reyes 2016).

La fotorreactivación es el proceso enzimático de reparación directa del ADN catalizado, ocurre en dos etapas. En la primera fase se forma un complejo entre enzimas y el dímero, no requiere luz, pero depende del pH y fuerza iónica, para la fase 2, se produce la monomerización que se activada por luz visible, permitiendo la formación de nuevos complejos de fotorreactivación (Estrada Ramirez, Corona Bautista, and Pedraza Reyes 2016).

Una dosis alta permite la aplicación del fenómeno fotorreactivación, pero una dosis inadecuada favorece la reproducción de los microbios y no permite aplicar el proceso de reactivación (Lara Oviedo, Navarro, and Atencio Altamiranda 2018).

## CAPÍTULO IV

### 4. Materiales y Métodos

#### 4.1 Descripción de la lámpara UV

En la construcción del reactor experimental de desinfección UV se utilizó una lámpara de mercurio de radiación de baja presión de la marca Hidrotek, es un dispositivo purificador diseñado para tratar aguas contaminadas, genera una potencia de 6W y una longitud de onda de 254nm. La luz ultravioleta emitida por la lámpara tiene la capacidad de atravesar la pared celular y causar daño al material genético del microorganismo, tiene una efectividad de destrucción de más del 99 % (America Water Treatment 2013) (Ver la imagen 1).



**Imagen 1.** Lámpara UV de baja presión.

**Fuente:** Propio Autor.

Los componentes de la lámpara ultravioleta de baja presión son los siguientes:

- Cámara UV “Caja del reactor”
- Tubo de vidrio.
- Tuerca de aluminio
- Tapa de silicona
- Lámpara UV cubierta con una manga de cuarzo.
- Adaptador de energía.

## 4.2 Información de los componentes de la lámpara

Con un Calibrador Vernier o Pie de Rey se midió los diferentes componentes del reactor UV de lámpara de baja presión (Ver la imagen 2), en la tabla 2 se encuentra especificado los resultados de las mediciones realizadas al equipo.



**Imagen 2.** Mediciones realizadas al tubo de vidrio y el cuarzo del reactor.

**Fuente:** Propio Autor.

**Tabla 2.** Especificaciones de las características del cuarzo y de la lámpara.

Características	Valor
P254: Potencia de la lámpara a 254nm (w)	6w
e: Grosor del cuarzo (mm)	1,6 mm
L: Longitud lámpara (cm)	18,9 cm
l: Longitud de la lámpara descubierta (cm)	.....
rR: Radio del reactor (cm)	2,55
rQ: Radio externo de la funda cuarzo (cm)	.....
TQ: % Transmitancia a 254nm del cuarzo	0,94
TW: % Transmitancia a 254nm del agua tratada	.....
Q: Caudal del agua tratada	.....

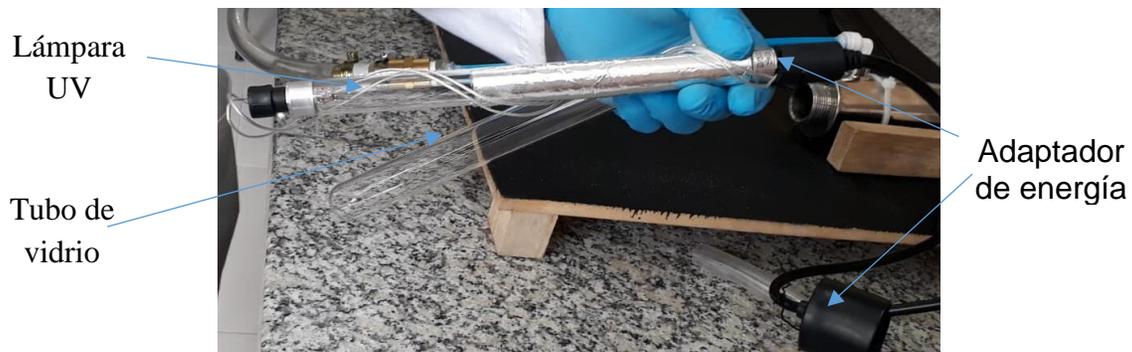
**Fuente:** Propio Autor.

### 4.3 Configuración de la lámpara

Para la configuración y puesta en funcionamiento de la lámpara en el reactor se realizaron los siguientes pasos.

#### Paso 1.

Se cubrió el 35% de la lámpara UV de baja presión con papel aluminio, luego se procedió a conectar el adaptador de la energía a la lámpara (Ver la imagen 3).



**Imagen 3.** Modificación de la lámpara UV de baja presión.  
Fuente: Propio Autor.

#### Paso 2.

En la punta del tubo de vidrio se colocó la tapa de silicona, para luego proceder a ubicar la lámpara dentro del tubo de vidrio (Ver la imagen 4).



**Imagen 4.** Lámpara ultravioleta dentro del tubo de vidrio.  
Fuente: Propio Autor.

### Paso 3.

Para verificar su correcto funcionamiento y evitar problemas posteriores se procedió a encender la lámpara de baja presión (Ver la imagen 5).



**Imagen 5.** Luz ultravioleta que emite la lámpara de baja presión.

**Fuente:** Propio Autor.

### Paso 4.

Con mucho cuidado se deslizó el tubo de vidrio dentro de la cámara ultravioleta, para después proceder a sella la cámara ultravioleta con la tuerca de aluminio (Ver la imagen 6).



**Imagen 6.** Cámara ultravioleta con el tubo de vidrio.

**Fuente:** Propio Autor.

#### 4.4 Construcción del reactor UV

En el laboratorio “Radiactividad - Toxicología” de la Universidad Politécnica Salesiana se llevó a cabo la construcción y el funcionamiento del reactor experimental de lámpara de baja presión de un solo paso, los materiales que se necesitaron son los siguientes.

- Bomba de agua.
- Accesorios de conexión (llaves de paso, tuberías, uniones de pvc, teflón, abrazaderas).
- Base de soporte (madera).
- Recipiente plástico con una capacidad de almacenar 20 litros de agua residual.
- Lámpara ultravioleta de baja presión.
- Recipiente de plástico estériles pequeños. (Para la recolección del agua tratada).

A continuación, se detalla los pasos necesarios seguidos para la construcción y configuración del reactor UV.

##### Paso 1

Con la ayuda de una herramienta fina se realizó un agujero en la parte inferior del recipiente de almacenamiento de agua residual, en el agujero se colocó una unión de pvc y una llave de paso, por medio de una manguera se conectó la llave de paso con la bomba de agua (Ver la imagen 7)



**Imagen 7.** Recipiente de agua residual conectado a la bomba de agua.

Fuente: Propio Autor.

## Paso 2

Por medio de la manguera y de uniones de pvc, la bomba de agua se conectó a dos llaves de paso, la misma que se encuentra unida a la lámpara UV de baja presión. La bomba de agua se encarga de hacer circular el agua a tratar, mientras las dos llaves de paso se encargan de regular la cantidad de agua que ingresa a la lámpara para su desinfección (Ver la imagen 8).



**Imagen 8.** Bomba de agua conectado a la lámpara UV de baja presión

**Fuente:** Propio Autor.

En la imagen 9 se puede observar el reactor experimental UV de lámpara de baja presión de un solo paso completamente terminado, todo el sistema se encuentra sobre la base de madera, excepto el recipiente de almacenamiento de agua de ensayo, para evitar fugas de agua se colocó teflón y se aseguró con abrazaderas.



**Imagen 9.** Reactor experimental tubular UV de lámpara de baja presión

**Fuente:** Propio Autor.

#### 4.5 Agua residual utilizada

El agua residual utilizada en el reactor experimental proviene de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba, ubicado en la ciudad de Cuenca, en la provincia del Azuay, en Ecuador (Ver la imagen 10). La PTAR de Ucubamba es la principal instalación encargada de tratar aguas residuales de la ciudad, desinfecta el 95% de aguas residuales de su localidad, cuenta con un tipo de tecnología no convencional, basado en un sistema de lagunaje (Duque-sarango et al. 2018).



**Imagen 10.** Planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba.

Fuente: Propio Autor.

#### 4.6 Filtración de agua residual

Previo a los ensayos con el agua residual de la PTAR Ucubamba, se hizo un proceso de filtración como se observa en la imagen 11, el sistema de filtración está constituido de una bomba de vacío, una manguera que permite de conexión entre los componentes, un matraz de kitasato y un embudo donde se coloca los filtros de papel.



**Imagen 11.** Sistema de filtrado para retirar partículas presentes en el agua residual.

**Fuente:** Propio Autor.

Los filtros de papel retienen una gran cantidad de materia orgánica e inorgánica (Ver la Imagen 12), el agua filtrada se almacenó en el recipiente del reactor para su posterior circulación en luz UV.



**Imagen 12.** Filtros de papel.

**Fuente:** Propio Autor.

#### **4.7 Parámetros bioquímicos del agua residual**

Las pruebas bioquímicas del agua residual, así como el filtrado del agua en el sistema de membrana y recuento de las colonias se desarrollaron en el laboratorio "Ciencias de la Vida" en el área de microbiología.

## **Turbidez y Color**

Para determinar la presencia de partículas orgánicas e inorgánicas en el agua residual se utilizó el equipo turbidímetro portátil de la marca LaMotte, el mismo equipo tecnología fue empleado en la medición del color del agua (Ver la imagen 13).

### **Procedimiento**

Se encendió el equipo portátil, en el vial (frasco) se separa muestras de agua destilada y muestras de agua residual, se enciende el equipo portátil, se selecciona el parámetro a medir, se ajusta el equipo al blanco (vial de agua destilada), se retira el blanco y se coloca el frasco de agua residual y se envía analizar, los resultados se encuentran descrito en la tabla 4.



**Imagen 13.** Turbidímetro portátil.

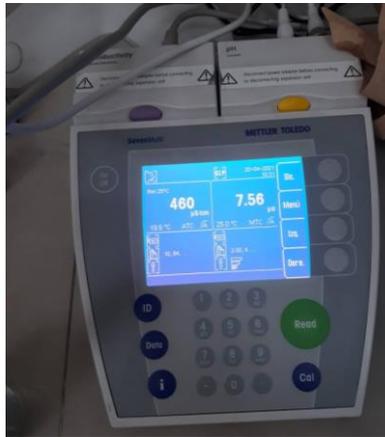
**Fuente:** Propio Autor.

## **Conductividad y pH**

El pHmetro de mesa de la marca Mettler Toledo se utilizó para analizar la cantidad de conductividad y de pH presente en el agua residual (Ver la imagen 14).

## Procedimiento

En vasos de precipitación se separó dos muestras de agua (destilada y residual), se enciende el equipo, se selecciona los parámetros a medir, se limpia los electrodos (electrodo de pH y conductividad) con agua destilada para luego proceder a secar con papel, por último, se coloca los electrodos en agua residual y se procede a realizar las mediciones, esperar que se estabilice para poder ver los resultados (Ver la tabla 4).



**Imagen 14.** pH metro de mesa.

**Fuente:** Propio Autor.

## Transmitancia

Para poder saber el porcentaje de transmitancia del agua de ensayo se empleó el espectrofotómetro UV a una longitud de onda de 254 nm (Ver la imagen 15).

## Procedimiento

Las muestras de agua destilada y agua residual se separaron en una cubeta (química), luego se procede a encender el Espectrofotómetro UV, se selecciona el parámetro a analizar y se modifica la longitud de onda, luego se ajusta el equipo al blanco (cubeta de agua destilada), se retira el blanco y se introduce la muestra del agua residual, se espera que se estabilice para poder ver los resultados (Ver la tabla 4).



**Imagen 15.** Espectrofotómetro UV.

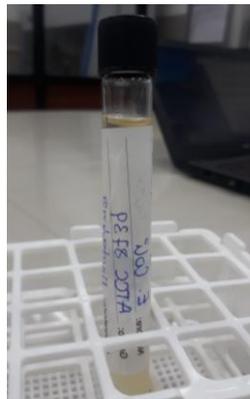
**Fuente:** Propio Autor.

#### **4.8 Propagación de la bacteria certificada en agar nutritivo**

Para la propagación de la cepa certificada ATCC 8739 se necesitó de un medio líquido nutritivo de TSB (Tryptic Soy Broth), en la estufa de secado la bacteria creció a una temperatura de 37 °C en un periodo de tiempo de 24 horas (Ver la imagen 16).

#### **Procedimiento de propagación**

- Siguiendo los protocolos de microbiología se procedió a abrir el tubo de la cepa certificada *Escherichia coli*.
- Con una pipeta se extrae aproximadamente 0,5 a 1,0 ml de bacteria y se deposita en el tubo o frasco de caldo nutritivo, mezclar bien e incubar los tubos.



**Imagen 16.** Cepa certificada de *Escherichia coli* ATCC 8739.

**Fuente:** Propio Autor.

Al utilizar una cepa certificada, no es necesario realizar pruebas bioquímicas, pero se puede realizar para mayor seguridad. La bacteria certificada se sembró en agar EMB (eosina y azul de metileno), al crecer en el medio de cultivo la bacteria presenta un brillo verde metálico, característica primordial de la bacteria E. coli, al realizar la prueba bioquímica: tención de gram se pudo observar en el microscopio que los bacilos eran de color rosa rojizo característico de bacterias gram negativas (Ver las imágenes en el anexo).

## **4.9 Pruebas iniciales y ajustes hidráulicos**

### **4.9.1 Inyección de la cepa certificada y circulación del agua residual en el reactor**

En 20 litros de agua residual, se inyectó 7 ml de bacteria certificada: Escherichia coli ATCC 8739, se dejó que la bacteria se estabilice con el agua residual en un tiempo aproximado de 20 a 35 minutos, para después proceder a circular por el reactor experimental.

Al encender la bomba de agua, el agua residual empieza a circular en el reactor UV, la cantidad de agua que circula son controlados a través de las llaves de paso. Estas llaves de paso permiten regular cinco o más caudales de agua, el agua contaminada ingresa a la lámpara de baja presión para su desinfección.

### **4.9.2 Recolección de la muestra**

Las diferentes muestras de agua residual se recolectan en recipientes estériles previamente rotulados (Ver la Imagen 17). La primera muestra de agua recolectada es el blanco, es decir; una muestra de agua residual sin la luz UV, las otras muestras de agua residual son recolectadas después de haber sido tratado con luz ultravioleta.



**Imagen 17.** Recipientes estériles para las muestras del agua tratada.

**Fuente:** Propio Autor.

#### 4.9.3 Medición del caudal en los ensayos experimentales

Para poder sacar los diferentes caudales de agua residual que ingresa a la lámpara UV para su desinfección, se precedió a realizar de la siguiente manera, con la ayuda de una probeta de 1000 ml se midió el tiempo que se demora en llenar dicha probeta (Ver la imagen 18), con la información del volumen y del tiempo se procede a calcular el caudal del agua que ingresa a la lámpara para su desinfección, para después proceder a determinar la dosis UV generada en cada caudal.



**Imagen 18.** Probeta de 1 litro con agua tratada.

**Fuente:** Propio Autor.

#### Fórmula del caudal

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

**Donde:**

Q = Caudal del agua (l/min).

V = Volumen (l)

t = tiempo (min).

Los resultados de las mediciones se encuentran reflejado en la tabla 5. A continuación el cálculo de dos parámetros necesarios para poder hallar la dosis UV suministrada por la lámpara.

#### 4.9.4 Cálculo de la longitud de la lámpara descubierta

La longitud de la lámpara es de 18,9 cm, se cubrió un 35% que equivale a 6,7 cm de lámpara cubierta con aluminio, para poder saber la longitud de la lámpara descubierta se aplicó la siguiente fórmula:

$$l = L - L_{Al} \quad (2)$$

**Donde:**

l: Longitud de la lámpara descubierta sin aluminio (cm).

L: Longitud total de lámpara (cm).

$L_{Al}$  : Longitud de la lámpara cubierta de aluminio (cm).

$$l = 18,9\text{cm} - 6,7\text{cm} = 12,2 \text{ cm} \quad (3)$$

#### 4.9.5 Cálculo del radio externo de la funda de cuarzo

$$rQ = r_{\text{reactor.}} - r_{\text{int. cuar.}} \quad (4)$$

**Donde:**

$rQ$ = radio externo de la funda de cuarzo (cm)

$r_{\text{reactor.}}$ =radio del reactor (cm)

$r_{\text{int. cuar.}}$  = radio interno del cuarzo (cm)

$$rQ = 2,55\text{cm} - 0,984\text{cm} = 1,56 \text{ cm} \quad (5)$$

#### 4.9.6 Cálculo de la dosis suministrada a diferentes caudales

##### Formula de la Dosis UV

Los cálculos de la dosis se realizaron teniendo en cuenta las recomendaciones de la USEPA (Romero-Martínez et al. 2019), los programas informáticos como Excel facilitaron el trabajo de cálculo, en la tabla 5 se refleja los resultados, a continuación la ecuación empleada:

$$\text{Dosis UV} = \frac{V_R}{Q} * \frac{P_{254} * TQ^e}{2L\pi^2 * (rR^2 - rQ^2)} \iint_{rQ}^{rR} \frac{TW^{r-rQ}}{r} * dx dy \quad (6)$$

##### Donde:

P254: Potencia de la lámpara a 254 nm, en lámparas nuevas 1/3 de la potencia (mWs/cm<sup>2</sup>).

e: Grosor del cuarzo (mm).

L: Longitud lámpara (cm).

l: Longitud descubierta si se cubre una parte de la lámpara (cm).

rR: Radio del reactor (cm).

rQ: Radio externo de la funda del cuarzo (cm).

TQ: % Transmitancia a 254nm del cuarzo (generalmente 0,94).

TW: % tramitación a 254nm del agua tratada.

Q: Caudal del agua que circula en el reactor.

#### 4.10 Preparación del medio de cultivo: Choromocult coliform agar

Es un medio de cultivo cromógeno, está constituido de nutrientes, permite la detección, la diferenciación y enumeración simultanea de *Escherichia coli* y otras bacterias coliformes en muestras de aguas, para desarrollarse necesita un tiempo menor a las 24 horas, el medio es producida por la corporación Merck (Merck Millipore 2014).

En este medio de cultivo pueden crecer diferentes tipos de colonias, en la tabla 3 se especifica los tipos de bacterias que pueden desarrollarse en este agar atreves de la técnica de sembrado en membrana.

**Tabla 3.** Interpretación de las colonias que desarrollan en el medio de cultivo.

<b>Bacterias</b>	<b>Color</b>
Escherichia coli	Colonias de azul a violeta
Coliformes	Colonias de rosa salmón a rojo
Otras bacterias	Colonias sin color, principalmente: Gran negativos.

**Fuente:** (Merck Millipore 2014).

El agar chromocult coliformes permite un buen contraste de color, permitiendo identificar con mayor facilidad el tipo de bacteria que se ha desarrollado en el medio cultivo, pero el tamaño, coloración y número de colonias también va depender de la calidad y tipo de membrana de filtración empleada en los ensayos (Merck Millipore 2014).

Para su preparación se siguió las indicaciones que especifica el medio de cultivo, se disolvió 26 gr de chromocult coliforme agar en 1000 ml de agua destilada, en la estufa se calentó la preparación a una temperatura de 90 °C. No sobrecalentar, ni autoclavar la preparación (Ver la imagen 19). En la cámara de flujo dejar enfriar el medio a 45 a 50 °C, para después colocar en placas Petri. Almacenar el recipiente en lugar fresco, bien cerrado.



**Imagen 19.** Chromocult coliform agar.

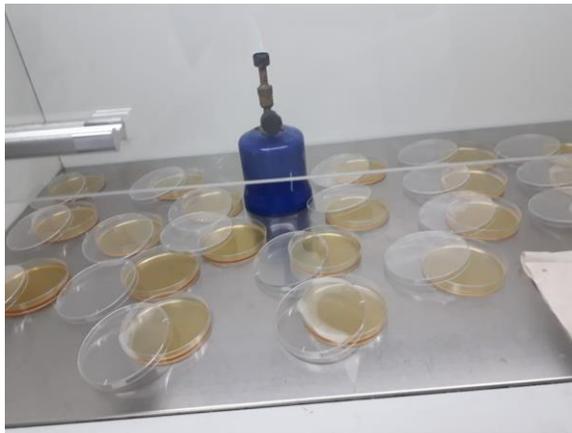
**Fuente:** Propio Autor.

## Cantidad de Preparación

20 Cajas Petri \* 15ml agar en cada caja Petri = **300ml**

$$\begin{array}{ccc} 26 \text{ gr} & \longrightarrow & 1000 \text{ ml} \\ X & & 300 \text{ ml} \\ X = \frac{(300 \text{ ml}) \times (26 \text{ gr})}{1000 \text{ ml}} & = & \mathbf{7,80 \text{ gr de Agar}} \end{array}$$

Para evitar que el medio de cultivo se contamine, todo el proceso de plaqueado se realizó en la cámara de flujo. Se debe limpiar con alcohol la cámara de flujo, dejar en luz UV por 15 minutos, luego de esto, encender el mechero y se procede a colocar el medio de cultivo líquido en las cajas petri, esperar que se solidifique y por último sellar con parafilm (Ver la imagen 20). Las cajas petri selladas son cubiertas con papel aluminio, colocadas en fundas ziploc y almacenadas en la refrigeradora para su posterior uso.



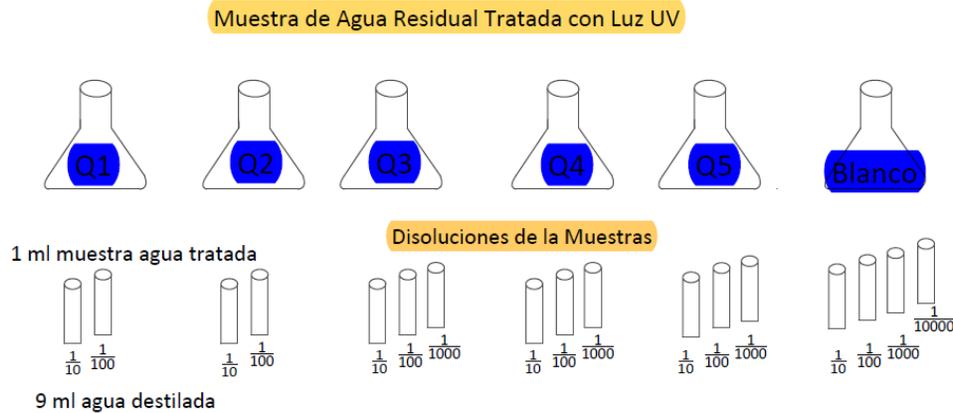
**Imagen 20.** Cámara de flujo con medio de cultivo.

**Fuente:** Propio Autor.

### 4.11 Disoluciones de las muestras de agua tratada

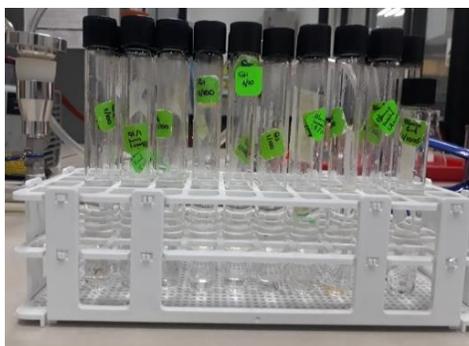
La disolución. - es un proceso en donde se combina dos o más sustancias perfectamente homogéneas, al unir un componente con el otro pierde completamente sus características individuales. Para las **muestras del caudal: Q<sub>1</sub> , Q<sub>2</sub>**, las disoluciones se realizó de la siguiente

manera: 1/10, 1/100 es decir; para 1/10, en un tubo de ensayo se coloca 9 ml de agua destilada y 1 ml de la muestra del agua desinfectada con radiación UV, para 1/100, en otro tubo de ensayo se coloca 9 ml de agua destilada y 1 ml de la disolución 1/10.



**Figura 6.** La cantidad de disoluciones realizadas a las muestras de agua residual tratada.  
**Fuente:** Propio Autor.

**Para las muestras: Q<sub>3</sub> , Q<sub>4</sub>, Q<sub>5</sub>,** las disoluciones se realizó de la siguiente manera: 1/10, 1/100, 1/1000, es decir; para 1/10, en un tubo de ensayo se coloca 9 ml de agua destilada y 1 ml de la muestra del agua desinfectada con radiación UV, para 1/100, en otro tubo de ensayo se procede agregar 9 ml de agua destilada y 1 ml de la disolución de 1/10 y para 1/1000, en otro tubo de ensayo agregamos 9 ml de agua destilada y 1 ml de la disolución de 1/100. Mientras para la **muestra del blanco** (lámpara apagada, sin luz ultravioleta) se realizó una disolución más es decir 1/10000 (Ver la figura 6 y la imagen 22).



**Imagen 21.** Disoluciones de las muestras de agua tratada.  
**Fuente:** Propio Autor.

#### 4.12 Técnica de filtración por membrana

Para la determinación de los microorganismos antes mencionados se empleó el método de filtración por membrana de acuerdo con la norma UNE EN ISO 7899-2: 2001, consiste en hacer pasar en la membrana microporosa un volumen conocido de una muestra líquida previamente homogeneizada (UNE 2019). El sistema de filtración de membrana está constituido de una bomba de vacío que está conectado a un matraz kitasato, esto a su vez está unido conjunto de rampas de filtración, permitiendo filtrar varias muestras en mismo momento (Ver la imagen 22).



**Imagen 22.** Equipo de filtración por membrana.

**Fuente:** Propio Autor.

#### **La membrana de filtración utilizada fue de tipo:**

- Estéril, de marca millipore, de color blanco,
- Con tamaños de poros de  $0,45\mu\text{m}$  con cuadrícula y
- Con un diámetro de 47mm.

Una vez colocada membrana millipore en el sistema de filtrado (Ver la imagen 23), se filtra la muestra, se retira la membrana con la ayuda pinza esterilizada, se coloca sobre la placa de petri que contiene el medio de cultivo y se procede a sellar correctamente con parafilm.



**Imagen 23.** Colocación de la membrana millipore en el sistema de filtrado.

**Fuente:** Propio Autor.

En posición invertida se colocó las cajas petri en la estufa de secado, a una temperatura y tiempo óptico de crecimiento de la bacteria (Ver la imagen 24). Para que la bacteria *Escherichia Coli* certificada ATCC 8739 se desarrolle correctamente, se recomienda que la estufa de cultivo debe estar una temperatura de 35°C a 37°C por un tiempo de 18 a 24 horas (Becton Dickinson BD 2013).

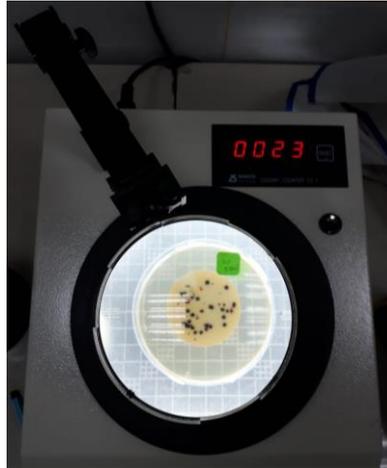


**Imagen 24.** Estufa de secado.

**Fuente:** Propio Autor

#### 4.13 Recuento de colonias

En el contador de colonias se realizó el recuento de las bacterias que han crecido en la membrana millipore, teniendo en cuenta la normativa: UNE-EN ISO 8199; 2008, las muestras/disoluciones aceptables son aquellas que generen de 10 a 200 colonias (UNE 2019) (Ver la imagen 25).



**Imagen 25.** Contador de colonias.  
**Fuente:** Propio Autor.

Existe diferentes formas para cuantificar la presencia de microorganismo, en microbiología el método más utilizado y sencillo es:

$$\text{UFC} = \frac{\text{Número de colonias}}{\text{Volumen filtrado (ml)}} * (\text{factor de dilución } 100) \quad (7)$$

**Donde:**

**UFC:** Unidades Formadoras de Colonias.

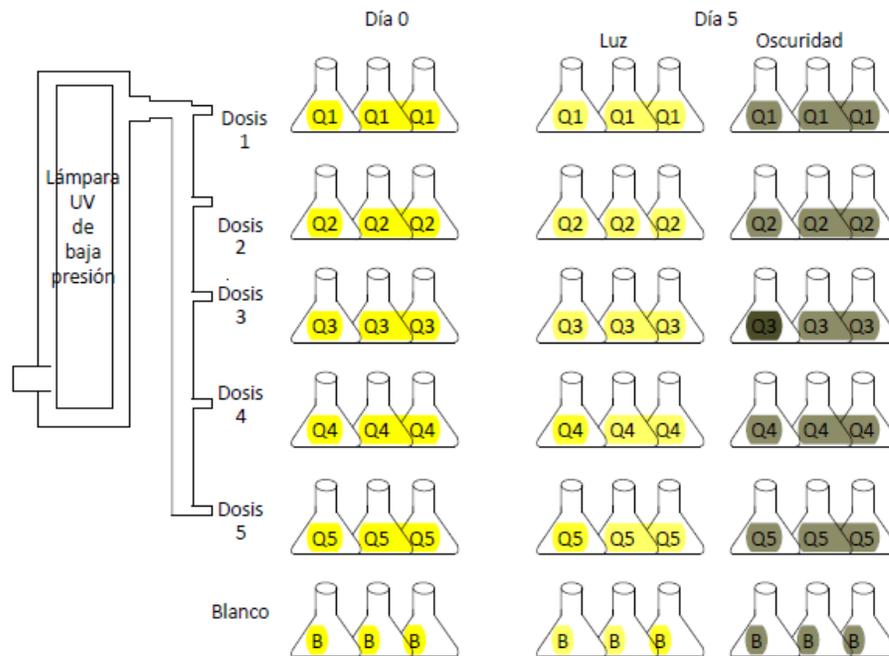
#### 4.14 Ajuste de los datos experimentales mediante software GINAFIT

Ginafit, es un software de uso gratuito para Microsoft Excel, muy utilizado por personas comunes y científicos que realizan enfoques de modelados predictivos de regresión no lineal, muy útil para representar modelamientos de supervivencia microbiana con datos experimentales con relación a la evolución de la población microbiana con el tiempo (KU Leuven 2016)

El investigador que tiene la idea de la forma de la curva de supervivencia del microorganismo el programa permite escoger un tipo modelo de curvas, en cambio a las personas que no tienen ninguna idea del modelo de la curva de supervivencia de microorganismo, el programa permite probar y comprobar los diferentes tipos de modelos. Algunos modelos de curvas a) Curvas log lineales clásicas, b) curvas de disminución log lineal, c) curvas cóncavas, d) curvas convexas, entre otros modelos de curvas (KU Leuven 2016).

#### 4.15 Reactivación de la cepa certificada *Escherichia coli* ATCC 8739

Los ensayos 5, 6 y 7 se utilizaron para reactivar la cepa *Escherichia Coli* ATCC 8739, los resultados de las pruebas bioquímicas realizadas al agua residual se encuentran reflejado en la tabla 4, en cambio los resultados de la cantidad de dosis UV suministrada por el reactor a diferentes caudales se encuentra descrito en la tabla 5.



**Figura 7.** Técnica de fotorreactivación y reactivación de la cepa *Escherichia coli*.

**Fuente:** Propio Autor.

La reactivación se realizó en luz y oscuridad, sembrando el día cero y el quinto día de reposo. El reposo se entiende tanto en Luz y oscuridad, para que suceda el fenómeno de la oscuridad las muestras de agua tratada se cubrieron con papel aluminio, entonces en cada ensayo se recolecta 18 muestras, es decir, en cada tiempo del ensayo se tomaron tres muestras de agua residual tratada con dosis UV (Ver la figura 7).

Para el proceso de reactivación es necesario que la bacteria se encuentre en reposo, las muestras de agua tratada son guardados en el equipo climático Binder por cinco días a una temperatura de 25°C (ver la imagen 26).



**Imagen 26.** Binder con muestras de agua tratada.

**Fuente:** Propio Autor.

La Cámara Climática Binder, es un equipo climático e incubadora que crea simulaciones ambientales físicas, químicas, biológicas, permite someter pruebas biológicas bajo condiciones de temperatura y humedad constante. Está diseñada para permitir una distribución homogénea de luz, con la posibilidad de seleccionar 3 espectro de luz, programando a tiempo real o semanal (Binder 2015).

Después de la incubación de las muestras de agua tratada en la Cámara Climática Binder se procedió a realizar disoluciones, el proceso de las disoluciones se encuentra especificado en el capítulo 4, en el literal 4,11 (Proceso de las disoluciones de las muestras de agua tratada), en cambio para la siembra del día cero como para la reactivación del día cinco se encuentra descrito en literal 4.12 (Técnica de filtración de membrana). Al siguiente día se realizó el conteo de colonias en el equipo contador de colonias.

#### 4.15.1 Evaluación cuantitativa de fotorreactivación y reparación en oscuridad

La ecuación de Lindenauer y Darby del año 1994 se utilizó para evaluar el efecto de la fotorreactivación de la bacteria certificada ATCC 8739.

$$\% \text{ Fotorreactivación} = \frac{N_t - N}{N_0 - N} * 100\% \quad (8)$$

**Donde:**

**N<sub>0</sub>:** Numero de bacterias antes de la irradiación ultravioleta (CFU/ml)

**N:** Número de bacterias inmediatamente después de la irradiación UV (CFU/ml)

**N<sub>t</sub>:** Numero de bacterias después de la reactivación durante un periodo de tiempo ultravioleta (CFU/ml).

Solo aquellas bacterias que fueron inactivadas son capaces de reactivarse, para saber la tasa de supervivencia de la bacteria certificada en relación al tiempo se utilizó la siguiente formula:

$$S = \frac{N_t}{N_0} * 100\% \quad (9)$$

**Donde:**

**S:** Tasa de supervivencia del microorganismo el tiempo.

**N<sub>0</sub>:** Numero de microorganismos antes de la irradiación ultravioleta (UFC/ml).

$N_t$ : Numero de microorganismo después de la fotorreactivación UV durante un cierto tiempo (UFC/ml).

Para el caso de la reparación es oscuridad se utilizó la misma fórmula anteriormente descriptas (ecuación 11y 12), los resultados estadísticos se encuentran representado en la tabla 15,16 y 17.

## CAPÍTULO V

### 5. Resultados y Discusión

Previo a llegar a los ensayos finales, se experimentaron en múltiples ensayos previos para poder tener claro la experticia de experimentación. De tal forma que al final se logró obtener 7 ensayos válidos, comparables y replicables. Los resultados se detallan a continuación.

#### 5.1 Análisis bioquímicos del agua residual

Los resultados de los diferentes análisis bioquímicos realizados al agua contaminada se encuentran detallado en la tabla 4.

**Tabla 4.** Parámetros bioquímicos del agua residual.

Agua residual	Color	Turbidez (FTU)	Conductividad (us/cm)	pH	%Transmitancia (254 nm)
Ensayo 1.	267	34	455	7,44	0,83
Ensayo 2.	203	28	457	7,59	0,80
Ensayo 3.	227	36	489	7,78	0,90
Ensayo 4.	243	30	478	7,68	0,86
Ensayo 5.	278	32	485	7,74	0,91
Ensayo 6.	233	30	458	7,59	0,89
Ensayo 7.	277	37	460	7,54	0,90

**Fuente:** Propio Autor.

## 5.2 Resultados de los ensayos de inactivación de la cepa *Escherichia coli* ATCC 8739

En la tabla 5, se puede verificar los distintos ensayos experimentales realizados en el reactor UV de lámpara de baja presión, se detalla el volumen, el tiempo, el caudal y la dosis UV suministrada por la lámpara en los diferentes caudales.

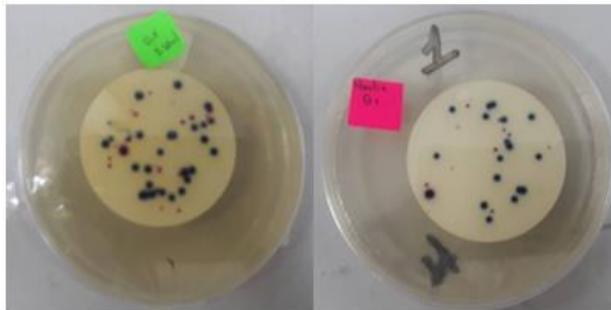
**Tabla 5.** Ensayos experimentales realizados en el reactor UV de lámpara de baja presión.

<b>Agua Residual + E. coli.</b>	<b>Regulación Llave de Paso</b>	<b>Volumen (l)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Q Agua pasa lámpara UV (l/h)</b>	<b>Dosis UV aplicada (mWs/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Ensayo 1</b>	Blanco	0	0	0	Sin Dosis UV
	Abierto min. 1	1	30,94	116,35	28,50
	Abierto 2	1	12,27	293,40	11,30
	Abierto 3	1	10,71	336,13	9,86
	Abierto 4	1	10,07	357,50	9,27
	Abierto máx. 5	1	10,02	359,28	9,23
<b>Ensayo 2</b>	Blanco	0	0	0	Sin Dosis UV
	Abierto min. 1	1	28,30	127,21	25,37
	Abierto 2	1	12,04	299,00	10,79
	Abierto 3	1	10,68	337,08	9,57
	Abierto 4	1	10,18	353,63	9,12
	Abierto máx. 5	1	10,09	356,79	9,04
<b>Ensayo 3</b>	Blanco	0	0	0	Sin Dosis UV
	Abierto 1	1	25,61	140,57	25,06
	Abierto 2	1	12,88	279,50	12,60
	Abierto 3	1	10,74	335,20	10,51
	Abierto 4	1	10,71	336,13	10,48
	Abierto máx. 5	1	10,32	348,84	10,10

	Blanco	0	0	0	Sin Dosis UV
	Abierto min. 1	1	25,92	138,89	24,51
	Abierto 2	1	12,65	284,58	11,96
<b>Ensayo 4</b>	Abierto 3	1	10,98	327,87	10,38
	Abierto 4	1	10,85	331,80	10,26
	Abierto máx. 5	1	10,73	355,51	10,15
	Blanco	1	0	0	Sin Dosis UV
	Abierto min. 1	1	31,85	113,03	31,43
	Abierto 2	1	14,20	253,52	14,20
<b>Ensayo 5</b>	Abierto 3	1	10,83	332,41	10,69
	Abierto 4	1	10,03	358,92	9,90
	Abierto máx. 5	1	9,39	383, 39	9,27
	Blanco	0	0	0	Sin Dosis UV
	Abierto min.1	1	34,03	105,79	33,02
	Abierto 2	1	14,52	247,93	14,52
<b>Ensayo 6</b>	Abierto 3	1	10,81	333,02	10,49
	Abierto 4	1	10,38	346,82	10,07
	Abierto máx. 5	1	9,98	360,72	9,98
	Blanco	0	0	0	Sin Dosis UV
	Abierto min. 1	1	36,35	99,04	35,57
	Abierto 2	1	15,45	233,01	15,12
<b>Ensayo 7</b>	Abierto 3	1	11,02	326,68	10,78
	Abierto 4	1	10,45	344,50	10,23
	Abierto máx. 5	1	9,50	378, 95	9,30

Fuente: Propio autor.

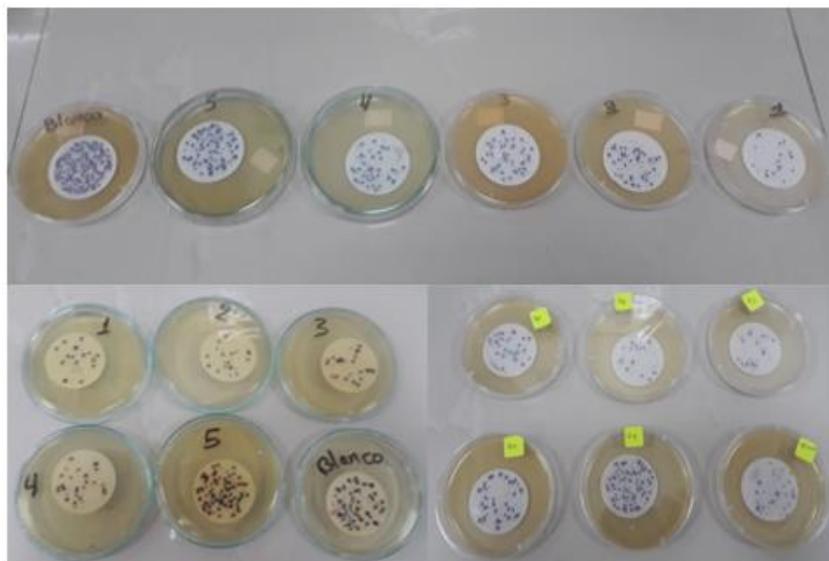
En la siguiente ilustración se puede visualizar el crecimiento de dos tipos bacterias, en mayor cantidad la presencia de colonias de *Escherichia coli* ATCC 8739 representadas de color azul a violeta y en menor cantidad la presencia de colonias coliformes representadas de color rojo salmonella. (Ver la imagen 27).



**Imagen 27.** Crecimiento de colonias de bacterias en el medio de cultivo.

**Fuente:** Propio Autor.

La eficiencia del reactor UV en inactivar e eliminar se encuentra reflejado en las siguientes imágenes, mayor efectividad cuando el reactor de lámpara de baja presión trata caudales pequeños, se visualiza menor crecimiento de bacterias, en cambio menor efectividad cuando trata caudales grandes, se produce mayor desarrollo de bacterias (Ver la imagen 28).



**Imagen 28.** Diferentes ensayos experimentales, crecimiento de colonias de bacterias *E. coli*.

**Fuente:** Propio Autor.

Las siguientes tablas revelan el porcentaje de inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739, la eliminación de la bacteria va a depender de la cantidad de dosis UV suministrado al agua contaminada, los resultados de la inactivación en los 7 ensayos se muestran en las siguientes tablas individuales.

**Tabla 6.** Inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739.

<b>ENSAYO: 1</b>			<b>FECHA: 25-02-2021</b>		
<b>Muestras</b>	<b>Dosis</b>	<b>Recuento</b>	<b>Nro. De</b>	<b>UFC/100ml</b>	<b>Log(Nt/No)</b>
<b>A.R + UV</b>	<b>(mJ/cm2)</b>	<b>Colonias</b>	<b>Colonias (UFC)</b>		
BLANCO	0	167	6,68E+05	2,67E+07	0,00
M1	28,5	35	1,40E+03	5,60E+04	-2,68
M2	11,3	65	2,60E+03	1,04E+05	-2,41
M3	9,86	80	3,20E+04	1,28E+06	-1,32
M4	9,27	85	3,40E+04	1,36E+06	-1,29
M5	9,23	95	3,80E+04	1,52E+06	-1,24

**Fuente:** Propio Autor.

**Tabla 7.** Inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739.

<b>ENSAYO: 2</b>			<b>FECHA: 03-03-2021</b>		
<b>Muestras</b>	<b>Dosis</b>	<b>Recuento</b>	<b>Nro. De</b>	<b>UFC/100ml</b>	<b>Log(Nt/No)</b>
<b>A. R. + UV</b>	<b>(mJ/cm2)</b>	<b>Colonias</b>	<b>Colonias (UFC)</b>		
BLANCO	0	74	2,96E+05	1,18E+07	0,00
M1	25,37	39	1,56E+03	6,24E+04	-2,28
M2	10,79	62	2,48E+03	9,92E+04	-2,08
M3	9,57	71	2,84E+04	1,14E+06	-1,02
M4	9,12	82	3,28E+04	1,31E+06	-0,96
M5	9,04	103	4,12E+04	1,65E+06	-0,86

**Fuente:** Propio Autor.

**Tabla 8.** Inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739.

<b>ENSAYO: 3</b>			<b>FECHA: 09-03-2021</b>		
<b>Muestras</b>	<b>Dosis</b>	<b>Recuento</b>	<b>Nro. De</b>	<b>UFC/100ml</b>	<b>Log(Nt/No)</b>
<b>A. R + UV</b>	<b>(mJ/cm2)</b>	<b>Colonias</b>	<b>Colonias (UFC)</b>		
BLANCO	0	72	2,88E+05	1,15E+07	0,00
M1	25,06	39	1,56E+03	6,24E+04	-2,27
M2	12,6	53	2,12E+03	8,48E+04	-2,13
M3	10,51	79	3,16E+04	1,26E+06	-0,96
M4	10,48	84	3,36E+04	1,34E+06	-0,93
M5	10,1	94	3,76E+04	1,50E+06	-0,88

**Fuente:** Propio Autor.

**Tabla 9.** Inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739.

<b>ENSAYO: 4</b>			<b>FECHA: 11-03-2021</b>		
<b>Muestras</b>	<b>Dosis</b>	<b>Recuento</b>	<b>Nro. De</b>	<b>UFC/100ml</b>	<b>Log(Nt/No)</b>
<b>A.R. + UV</b>	<b>(mJ/cm2)</b>	<b>Colonias</b>	<b>Colonias (UFC)</b>		
BLANCO	0	88	3,52E+05	1,41E+07	0,00
M1	24,51	30	1,20E+03	4,80E+04	-2,47
M2	11,96	52	2,08E+03	8,32E+04	-2,23
M3	10,38	58	2,32E+04	9,28E+05	-1,18
M4	10,26	68	2,72E+04	1,09E+06	-1,11
M5	10,15	87	3,48E+04	1,39E+06	-1,00

**Fuente:** Propio Autor.

**Tabla 10.** Inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739.

<b>ENSAYO: 5</b>			<b>FECHA: 07-04-2021</b>		
<b>Muestras</b>	<b>Dosis</b>	<b>Recuento</b>	<b>Nro. De</b>	<b>UFC/100ml</b>	<b>Log(Nt/No)</b>
<b>A.R. + UV</b>	<b>(mJ/cm2)</b>	<b>Colonias</b>	<b>Colonias (UFC)</b>		
BLANCO	0	69	2,76E+05	1,10E+07	0,00
M1	31,43	22	8,80E+02	3,52E+04	-2,50
M2	14,01	24	9,60E+02	3,84E+04	-2,46
M3	10,69	30	1,20E+04	4,80E+05	-1,36
M4	9,9	37	1,48E+04	5,92E+05	-1,27
M5	9,27	75	3,00E+04	1,20E+06	-0,96

**Fuente:** Propio Autor.

**Tabla 11.** Inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739.

<b>ENSAYO: 6</b>			<b>FECHA: 09-04-2021</b>		
<b>Muestras</b>	<b>Dosis</b>	<b>Recuento</b>	<b>Nro. De</b>	<b>UFC/100ml</b>	<b>Log(Nt/No)</b>
<b>A.R. + UV</b>	<b>(mJ/cm2)</b>	<b>Colonias</b>	<b>Colonias (UFC)</b>		
BLANCO	0	72	2,88E+05	1,15E+07	0,00
M1	33,02	19	7,60E+02	3,04E+04	-2,58
M2	14,52	27	1,08E+03	4,32E+04	-2,43
M3	10,49	35	1,40E+04	5,60E+05	-1,31
M4	10,07	52	2,08E+04	8,32E+05	-1,14
M5	9,98	79	3,16E+04	1,26E+06	-0,96

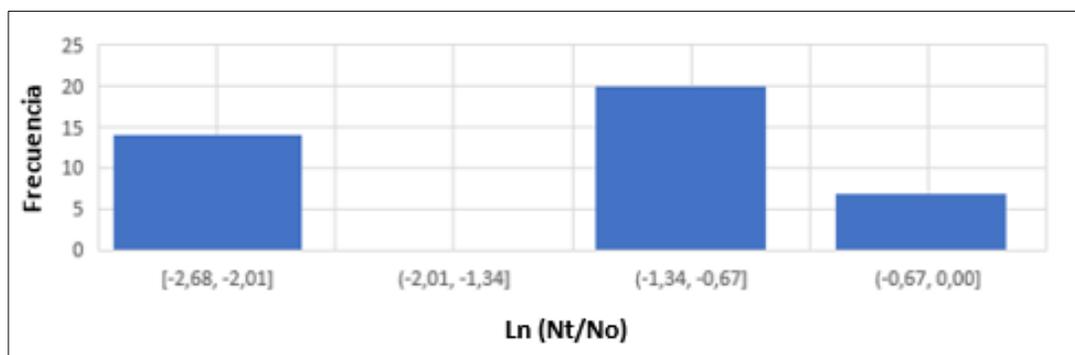
**Fuente:** Propio Autor.

**Tabla 12.** Inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739.

ENSAYO: 7		FECHA: 21-04-2021			
Muestras	Dosis	Recuento	Nro. De	UFC/100ml	Log(Nt/No)
A.R.+ UV	(mJ/cm2)	Colonias	Colonias (UFC)		
<b>BLANCO</b>	0	39	1,56E+05	6,24E+06	0,00
<b>M1</b>	35,57	22	8,80E+02	3,52E+04	-2,25
<b>M2</b>	15,12	26	1,04E+03	4,16E+04	-2,18
<b>M3</b>	10,78	27	1,08E+04	4,32E+05	-1,16
<b>M4</b>	10,23	51	2,04E+04	8,16E+05	-0,88
<b>M5</b>	9,3	78	3,12E+04	1,25E+06	-0,70

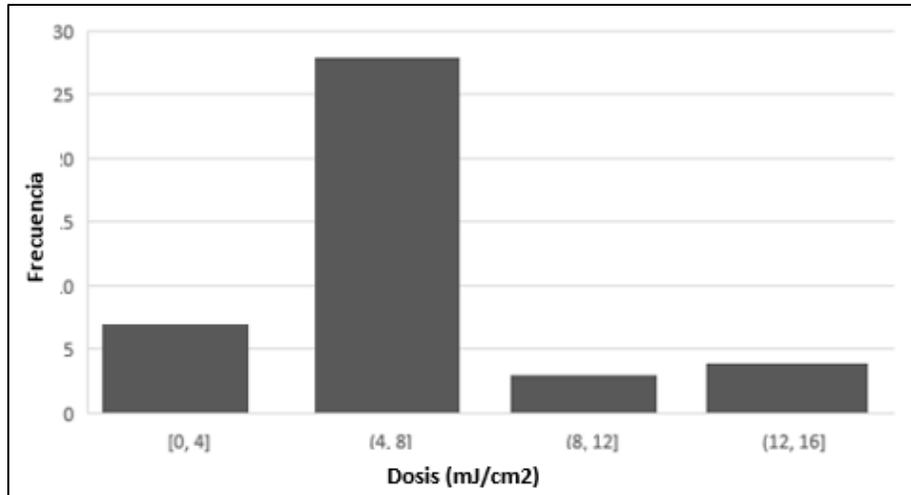
Fuente: Propio Autor.

En unidades logarítmicas, los ensayos experimentales demuestran que la frecuencia de inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739 se encuentra en dos rangos: (-2,68, -2,01) y (-1,38,-0,67), ver la imagen 29, en cambio en relación a la dosis UV, la frecuencia de inactivación de la bacteria certificada se encuentra entre (4,8). Esto se explica por las posibilidades de variación del caudal en el sistema, mismo que era manipulable siempre bajo las mismas condiciones y por tanto a dosis similares en todos los ensayos (Ver la imagen 30).



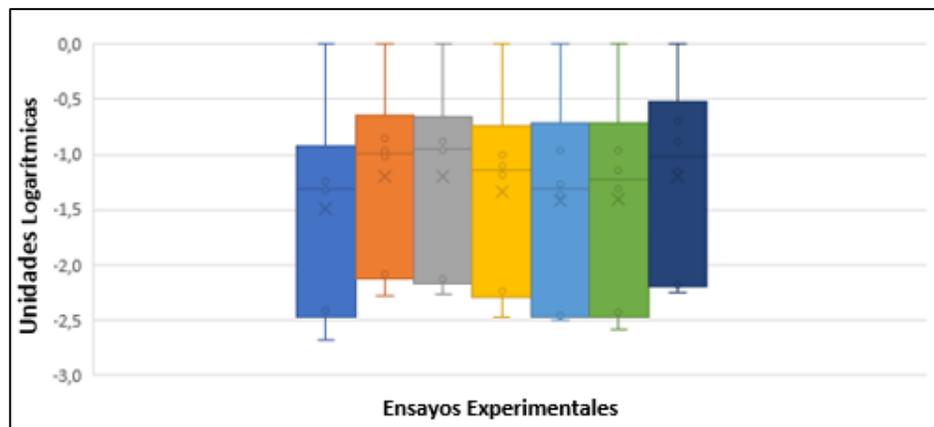
**Imagen 29.** Frecuencia de inactivación de la Cepa E. coli en función logarítmica.

Fuente: Propio Autor.



**Imagen 30.** Frecuencia de inactivación de la Cepa E. coli en relación a la dosis UV.  
**Fuente:** Propio Autor.

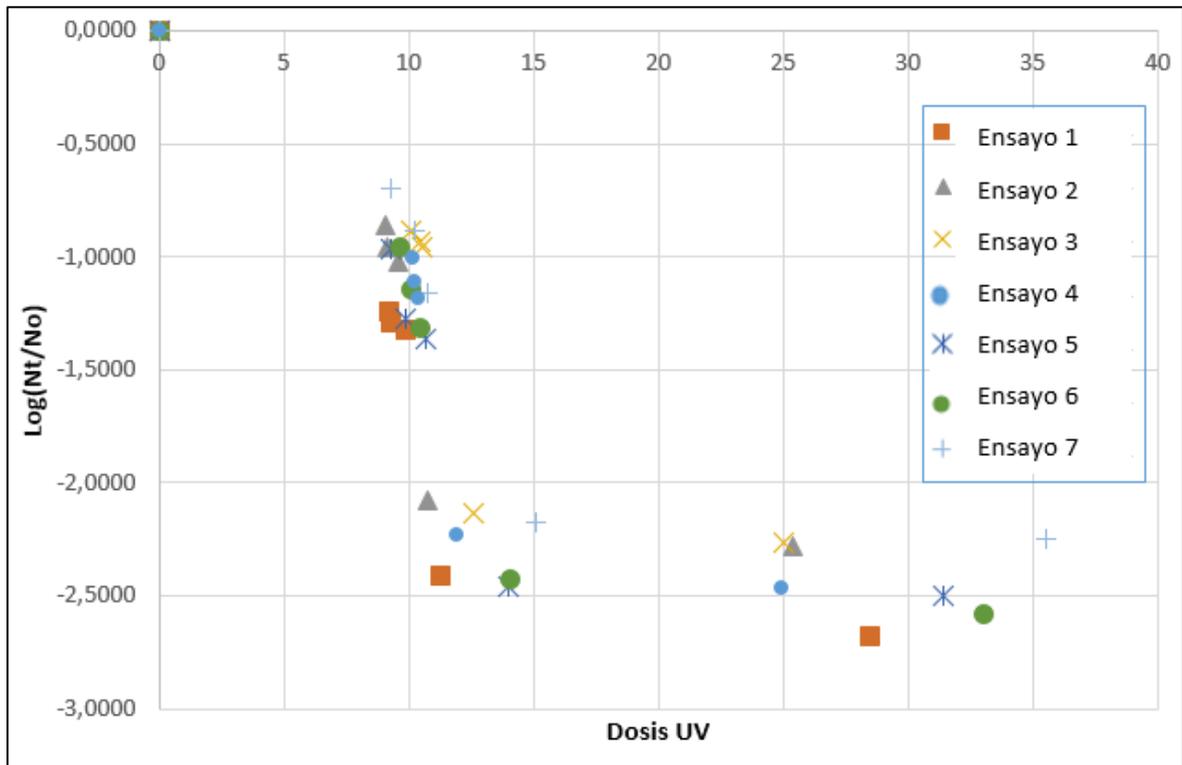
Todos los 7 ensayos experimentales se realizaron en condiciones similares, reflejan una media de inactivación cercana a 1,5 dando como resultado que la inactivación de la bacteria se produce en un rango muy próximo a cero hasta las 2,5 unidades logarítmicas de reducción (Ver la imagen 31 representado en diagrama de cajas y bigotes).



**Imagen 31.** La media de inactivación de la cepa escherichia coli ATCC 8739.  
**Fuente:** Propio Autor.

Puntos agrupados muy próximos demuestran que la bacteria certificada ATCC 8739 tuvo un comportamiento muy similar en los distintos ensayos experimentales realizados, se manifiesta

en primera instancia que los resultados de los 7 ensayos pueden ser significativos (Ver la imagen 32).



**Imagen 32.** Perfil de inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739.

**Fuente:** Propio Autor.

El perfil de inactivación demuestra un comportamiento exponencial decreciente, esto es conforme mayor es la dosis suministrada mayor será las unidades logarítmicas de inactivación de la bacteria. Por ejemplo, en el ensayo 7 revela que un tiempo de exposición 9,50 segundos, con una dosis de 9,30 (mJ/cm<sup>2</sup>) se logra una inactivación mínima de 0,70 de E. coli. Cuando la bacteria está expuesta mayor tiempo a dosis UV, se logra mayor cantidad de inactivación, como en el caso del ensayo del ensayo 1, en un tiempo de exposición de 30,94 segundos, con una dosis UV de 28,50 (mJ/cm<sup>2</sup>) se logra una inactivación de 2,68 de E. coli (Ver la imagen 32).

Adicional se realizó un análisis de varianza de un factor y poder determinar la significación, los resultados estadísticos se muestran en la tabla 13 y 14, se puede observar que el P-valor (probabilidad igual a **5,89E-17**) es menor que 0,01 con lo cual se rechaza la hipótesis nula; y se acepta la hipótesis alternativa, se concluye que si hay diferencias significativas de las medias de los valores de los 7 ensayos. Esto se puede explicar porque las condiciones de ejecución de los ensayos son distintas entre ellos, condiciones de inicio como las características del agua residual, caudales y por tanto dosis distintas, aunque próximas, sin embargo, son distintas para caudales similares, puesto que la transmitancia influye en la dosis, y esta transmitancia depende de la calidad del agua residual en cada ensayo, esto solamente analizando una posible variable cambiante entre los ensayos. Otra situación podría ser cantidad de microorganismos que se disponen en el tanque de circulación, que lógicamente es difícil que sea el mismo en todos los ensayos. Por lo tanto, no cabe aquí profundizar en un análisis estadístico por que la replicabilidad no se cumple en cuando al análisis e varianza de un factor, se necesitaría modificar la experimentación, y sin embargo así sería difícil lograr replicabilidad, de echo en los trabajos previos a este, no se habla de replicabilidad entre los ensayos, sino más bien con los ensayos válidos se pasa al análisis de las cinéticas y el modelo matemático que refleje mejor el comportamiento.

**Tabla 13.** Análisis de varianza de un factor.

<b>RESUMEN</b>				
<b>Grupos</b>	<b>Muestras</b>	<b>Suma</b>	<b>Promedio</b>	<b>Varianza</b>
Dosis	42	224,67	5,35	16,03
Taza Crecimiento	42	-55,44	-1,32	0,72

**Fuente:** Propio Autor.

**Tabla 14.** Análisis de varianza de los ensayos experimentales.

<b>Origen de las Variaciones</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Grados de Libertad</b>	<b>Promedio de los Cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Valor Crítico Para F</b>
Entre grupos	934,06	1	934,06	111,52	<b>5,89E-17</b>	3,96
Dentro de los grupos	686,80	82	8,38			
<b>Total</b>	1620,86	83				

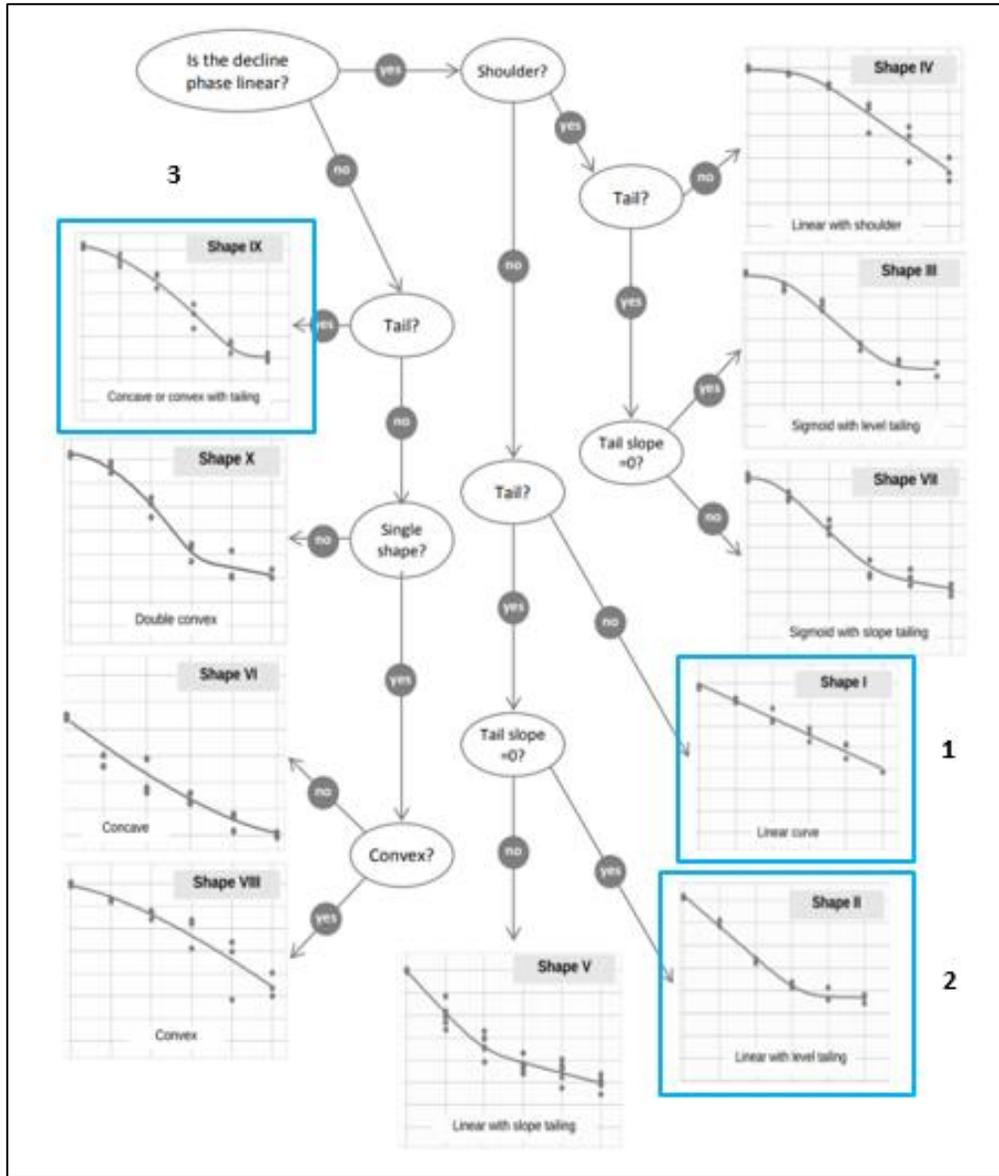
**Fuente:** Propio Autor.

A diferencia de otros sistemas, en la tecnología de desinfección UV la tasa de inactivación no se ve afectada ni por la temperatura, ni por el pH (Wright and Cairns 1996), pero existen otros parámetros que sí afectan. Al aumentar la turbiedad disminuye la efectividad de la desinfección (Roldan Fonseca 2019), las pruebas bioquímicas de las aguas residuales de Ucubamba tienen un pH promedio de 7, con una turbiedad elevada en un rango de 28 a 37 FTU, la turbiedad puede ser una de las principales causas en este estudio científico de no conseguir una mayor tasa de inactivación de la cepa *Escherichia coli* ATCC 8739.

### **5.2.1 Ajuste de los datos a los modelos teóricos de inactivación bacteriana**

El efecto inactivante de la dosis de UV, se estudió cuantitativamente utilizando los parámetros cinéticos de las curvas de dosis- respuesta. Los logaritmos de datos de supervivencia obtenidos de los 7 experimentos se representaron frente a sus valores correspondientes de la dosis de UV que se aplicó, lo que obtuvo una curva de dosis-respuesta para cada ensayo. La curva dosis-respuesta se ajustó observando visualmente el comportamiento de los datos en función de los modelos que dispone el programa informático GINAFIT, en este caso se ajustaron a 3 modelos, el

primero un modelo log-lineal clásico (forma de curva 1), el segundo un modelo log-lineal + hombro (forma de curva 2), y el tercero un modelo bifásico (forma de curva 3).



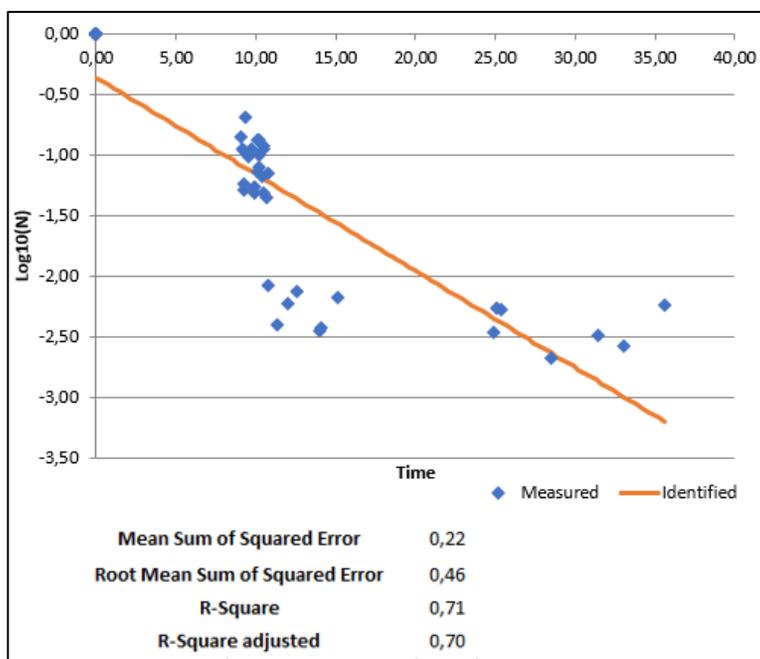
**Imagen 33.** Los resultados de los ensayos experimentales ajustados a los 3 modelos de curvas.  
**Fuente:** Propio Autor.



**Imagen 34.** Representación de los 3 modelos de curvas en el programa GINAFIT.

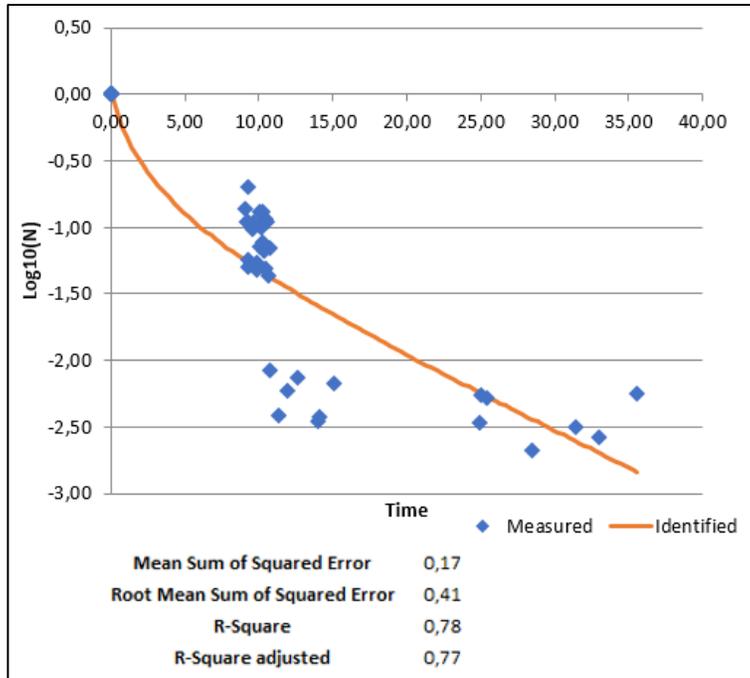
**Fuente:** Propio Autor.

Los ajustes a los 3 modelos se presentan a continuación, cabe destacar que GINAFIT realiza un gráfico de la concentración de microorganismos en función del tiempo, gráfico que no se puede modificar, por lo tanto, aclarar que el eje “X” para nuestro caso representa la dosis UV (mJ/cm<sup>2</sup>) (Imágenes: 35, 36 y 37).



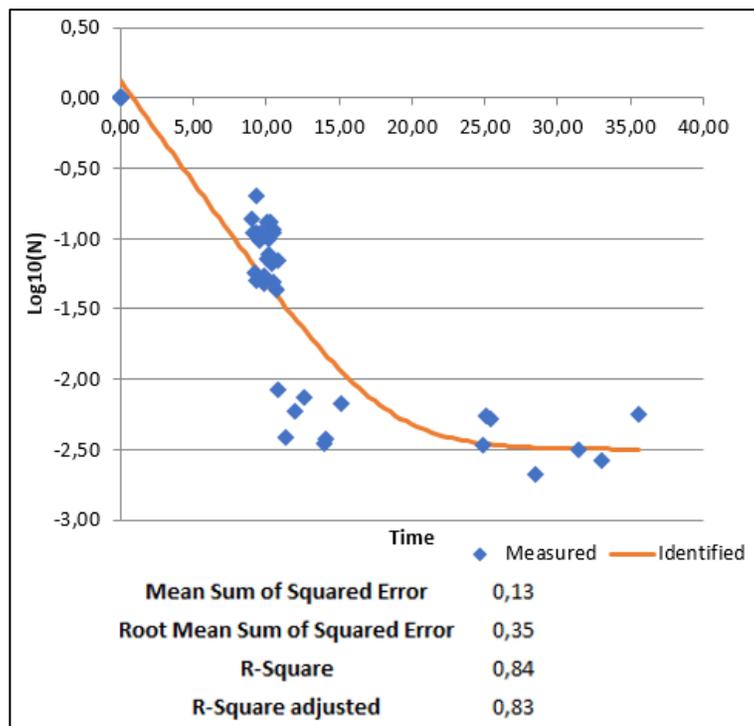
**Imagen 35.** Perfil de inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739 representado en el modelo Log regresión lineal.

**Fuente:** Propio Autor.



**Imagen 36.** Perfil de inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739 representado en el modelo Log lineal + hombro.

**Fuente:** Propio Autor.



**Imagen 37.** Perfil de inactivación de la cepa Escherichia coli ATCC 8739 representado en el modelo bifásico.

**Fuente:** Propio Autor.

La mayoría de los datos sobre inactivación UV de microorganismos en la literatura siguen el modelo log-lineal o bifásico; en algunas ocasiones, un hombro también está presente a bajas dosis de UV (Asensi et al. 2019). Según las curvas dosis-respuesta obtenidas en este estudio, no se observó hombro, pero no se puede descartar su existencia a dosis de UV inferiores a las utilizadas en los experimentos. La desinfección siguiendo el modelo bifásico implica una pérdida de eficacia tras la inactivación de una determinada proporción de los organismos determinada por el parámetro “f”. La pérdida de eficacia con dosis altas de UV es una característica común en la desinfección UV, conocida como “cola”, y sus causas están bajo debate (Romero-Martínez et al. 2019).

Un análisis gráfico es muy útil, pero es necesario un análisis matemático más profundo para valorar la confiabilidad del ajuste del modelo. Un modelo de ajuste permite determinar si el ajuste es suficiente, si no es suficiente es necesario buscar nuevos modelos de ajustes (Aguirre García 2012).

**Tabla 15.** Comparación de la bondad de ajuste obtenida para los modelos: Log-lineal clásico, Log-lineal + hombro y Bifásico

Modelo	Ecuación	R <sup>2</sup>	ECM	Parámetros	Valor Parámetros	Standard Error
Log-Linear Regresión (Bigelow and Esty, 1920)	$N = N_0 * \exp(-k_{max} * t)$	0,71	0,22	kmax LOG10(N0)	0,18 -0,37	0,02 0,12
Log-Linear+Shoulder (Geeraerd et al, 2000)	$N = N_0 * \exp(-k_{max} * t) * (\exp(k_{max} * SI)) / (1 + (\exp(k_{max} * SI) - 1) * \exp(-k_{max} * t))$	0,78	0,17	SI (Shoulder length) kmax LOG10(N0)	-16,60 0,13 0,01	7,60 0,02 0,15
<b>Biphasic Model (Cert O, 1977)</b>	$\log_{10}(N) = \log_{10}(N_0) + \log_{10}(f * \exp(-k_{max1} * t) + (1-f) * \exp(-k_{max2} * t))$	0,84	0,13	f kmax1 kmax2 LOG10(N0)	0,9976 0,34 0,00 0,12	0,0057 0,04 0,08 0,13

**Fuente:** Propio Autor.

De los tres modelos anteriormente representados gráficamente se presenta un resumen de desempeño del ajuste estadístico en la Tabla 15, se observa que presenta una mejor bondad de ajuste el modelo bifásico puesto que muestra un R<sup>2</sup> de 0,84 y un ECM (error cuadrado medio) de 0,13. Determinando por tanto que las curvas de supervivencia obtenidas difieren de la forma lineal. Este último es el que presentó la mejor bondad de ajuste y validación, por lo que es considerado como un modelo predictivo adecuado para describir las curvas de inactivación de E. Coli ATCC 8739 posibilitando la determinación de la concentración de microorganismos luego de dosis UV suministrada.

Por lo tanto, se reformulo el modelo (ecuación 10) en función de los parámetros determinados con el ajuste estadístico (ecuación 11).

#### **Modelo de inactivación identificado**

$$\log_{10}(N) = \log_{10}(N_0) + \log_{10}(f \cdot \exp(-k_{\max 1} \cdot t) + (1-f) \cdot \exp(-k_{\max 2} \cdot t)). \quad (10)$$

#### **Para propósitos de identificación reformulado como**

$$\log_{10}(N) = 0,12 + 0,12 (0,998 \cdot \exp(-0,34 \cdot t) + (1 - 0,008) \cdot \exp(-0,00 \cdot t)). \quad (11)$$

El coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) permite tener una idea del ajuste total conseguido, el mejor modelo de predicción debe tener un valor más cercano a 1 (Aguirre García 2012). Teniendo en cuenta esta condición en el estudio de cinética de inactivación de Escherichia coli ATCC 8739 en aguas residuales, el modelo que más se ajusta es el Bifásico, con un coeficiente de determinación de 0,84 (Ver la tabla 15).

También hay que tener en cuenta la Raíz del Error Cuadrático Medio que mide el error cuadrático medio (ECM) entre el valor real y el predicho por un modelo (Aguirre García 2012), si el valor de error cuadrático medio igual a cero significa que mayor es la bondad de ajuste al modelo (Mendiara 2013). En este estudio el modelo difásico se ajusta más a la realidad, con valor de error

cuadrado medio de 0,13, se visualiza que mayor cantidad muestras se acercan a la línea de inactivación (Ver la imagen 37).

La mayoría de científicos tienen en cuenta los 2 parámetros de ajuste, como en el estudio de inactivación de *E. coli* con radiación UV/visible en aguas de salidas de depuradora realizado por Mendiara, después de analizar con los 4 modelos (el modelo Bifásico, el modelo Mafart, el modelo de Hom y el modelo de Geeraerd, el modelo que más se ajustó es el modelo bifásico ( $r^2=0,97$ ,  $EMC=0,57$ ), para este estudio luz visible se consiguió al simular en una cámara solar que genera longitud de ondas entre 290 y 800nm (Mendiara 2013).

Jácome asegura en su estudio que la mejor bondad de ajuste fue el obtenido por la ecuación modificada de Gompertz logrando valores de  $R^2 = 0,990$ , un  $RMSE = 0,138$  en el estudio de cinéticas de inactivación de *Escherichia coli* CECT 433 inoculada en medio de referencia por tratamientos con altas presiones hidrostáticas (Jácome 2008).

Pero hay otras investigaciones que tienen en cuenta un solo parámetro de ajuste como en el caso de la inactivación de *Escherichia coli* por medio de luz pulsada en jugos de manzana, el modelo que más se ajusta es el Bifásico, sin bien no todos los valores se ajustaron a la curva de inactivación, logrando tener  $RMSE$  de 0,10 a una dosis máxima de 0,73 J/cm<sup>2</sup> (Ferrario and Guerrero 2016).

Sin embargo no siempre el modelo bifásico se va a ajustar más a la realidad, en un estudio realizado por Antonio Benites en el año 2013 con relación al análisis y modelización de la inactivación de *Escherichia Coli* en aguas residuales, da como resultado que la cinética de inactivación de *E. coli* se ajusta más a una curva de forma Weibull, con valores de  $n$  menores a 1 (Benitez Rodas 2013).

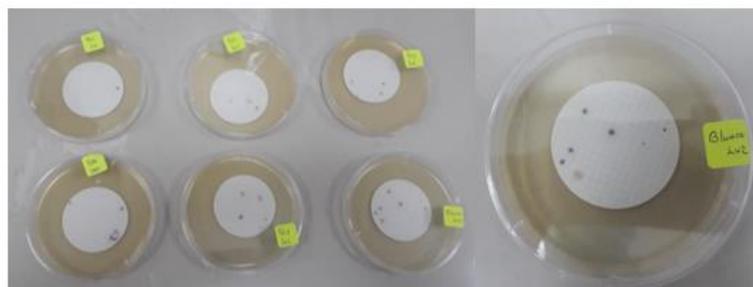
Se comprobado que a mayor dosis UV irradiada al agua contaminada, mayor grado de efectividad, menor porcentaje de inactivación de la bacteria *Escherichia coli* ATCC 8739, (Ver las imágenes: 28 y 32 ), estando totalmente de acuerdo con lo que afirma (Millán et al. 2015).

En la actualidad, Chromocult es el medio más reciente y muy utilizado que permite detección de *E coli* coliformes totales en aguas no tratada (Benitez Rodas 2013), pero si es necesario utilizar otro medio de cultivo que permita el crecimiento de un solo tipo de bacteria, esto permite reducir la probabilidad de cometer errores a la hora del recuento de colonias.

Una investigación realizada por los investigadores Acosta, Cairo y Perico en el año 2015, afirman que se necesita un tiempo de exposición de 300 segundos para lograr efectos de inactivación en el microorganismo, en cambio Aguirre, García, and Sahuquillo (2004) logro inactivar en un tiempo 6 segundos. En caso de mi investigación mayor efectividad de inactivación de la cepa certificada ATCC 8739 se logró en un tiempo de exposición de 36,15 segundos.

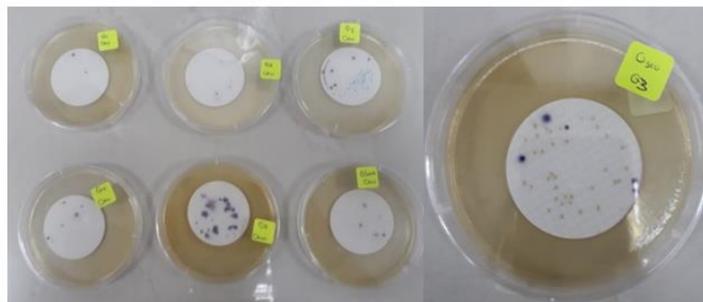
### **5.3 Resultados de la cinética de reactivación cepa *Escherichia coli* ATCC 8739**

Después de la incubación en luz y en oscuridad en la cámara climática Binder tras la irradiación de dosis UV, al quinto día se visualizó un mínimo crecimiento de bacteria *Escherichia coli* ATCC 8739 de color azul a violeta y otros tipos de microorganismos (Ver la imagen 38 y 39, respectivamente).



**Imagen 38.** Fotorreactivación de la bacteria *Escherichia coli* ATCC 8739.

**Fuente:** Propio autor.



**Imagen 39.** Reactivación en oscuridad de la bacteria Escherichia coli ATCC 8739.

**Fuente:** Propio autor.

A continuación, un análisis estadístico de los resultados de la reactivación en oscuridad y fotorreactivación de los diferentes ensayos experimentales.

**Tabla 16.** Reactivación en oscuridad y fotorreactivación de la cepa E. coli ATCC 8739.

ENSAYO 5			FECHA: 07-04-2021			
Muestras A.R. + UV	Nro. Colonias (UFC)	$\ln(N_t/N_0)$	Reactivación Osc. 5 días (%)	S. Osc. (%)	Fotorreact. 5 días (%)	S. Luz (%)
Blanco	2,76E+05	0,00	0,00	14,49	0,00	33,3
M1	8,80E+02	-2,50	-0,32	0,00	-0,23	27,3
M2	9,60E+02	-2,46	-0,32	0,03	-0,31	12,5
M3	1,20E+04	-1,36	-3,79	0,72	-3,03	33,3
M4	1,48E+04	-1,27	-4,44	1,16	-4,29	24,3
M5	3,00E+04	-0,96	-10,57	1,45	-8,94	26,7

**Fuente:** Propio Autor.

**Tabla 17.** Reactivación en oscuridad y fotorreactivación de la cepa E. coli ATCC 8739.

ENSAYO 6			FECHA: 09-04-2021			
Muestras A.R. + UV	Nro. Colonias (UFC)	Ln(Nt/No)	Reactivación Osc. 5 días (%)	S. Osc. (%)	Fotorreact. 5 días (%)	S. Luz (%)
Blanco	1,56E+05	0,00	0,00	4,17	0,00	8,33
M1	8,80E+02	-2,58	-0,24	0,03	-0,25	5,26
M2	1,04E+03	-2,43	-0,31	0,07	-0,35	7,41
M3	1,08E+04	-1,31	-4,23	0,83	-4,53	11,43
M4	2,04E+04	-1,14	-6,89	0,83	-7,34	5,77
M5	3,12E+04	-0,96	-11,86	0,42	-11,70	5,06

Fuente: Propio Autor.

**Tabla 18.** Reactivación en oscuridad y fotorreactivación de la cepa E. coli ATCC 8739.

ENSAYO 7			FECHA: 21-04-2021			
Muestras A.R. + UV	Nro. Colonias (UFC)	Ln(Nt/No)	Reactivación Osc. 5 días (%)	S. Osc. (%)	Fotorreact. 5 días (%)	S. Luz (%)
Blanco	1,56E+05	0,00	0,00	17,95	0,00	10,26
M1	8,80E+02	-2,25	-0,49	0,08	-0,54	4,55
M2	1,04E+03	-2,18	-0,59	0,08	-0,65	3,85
M3	1,08E+04	-1,16	-7,16	0,26	-6,89	7,41
M4	2,04E+04	-0,88	-13,57	1,28	-14,45	3,92
M5	3,12E+04	-0,70	-23,40	1,28	-24,36	2,56

Fuente: Propio Autor.

En la mayoría de artículos científicos afirman que las bacterias que han sufrido algún daño producto de una dosis UV-C muy baja, tienen dos mecanismos de reparación, pueden ser fotorreactivación que es en presencia de luz o el mecanismo de reparación en oscuridad (González Ortiz 2019), científicamente los mecanismos de reparación están muy establecidos, pero los periodos de reactivación hay mucho que estudiar.

Una investigación ha demostrado que existe porcentajes bajos de reactivación de *Escherichia coli* después de recibir una radiación de LED UV de 275nm, reparación en oscuridad estuvo por debajo del 0,13% mucho más bajo que la fotorreactivación que tiene porcentajes por encima del 0,02%, en ambos casos el periodo de reparación fue de 9 horas (Onkundi Nyangaresi et al. 2018).

En esta investigación se puede comprobar que existe una tasa de supervivencia de los microorganismos muy baja que sobrevivieron después de los ensayos de inactivación, el porcentaje de fotorreactivación y reactivación en oscuridad fue negativa, dando entender que la bacteria certificada no tiene la capacidad de reactivar a un tiempo de determinación de 5 días (Ver las tablas: 16,17 y 18), sin embargo no sabemos si para tiempos menores se dio la reactivación, situación que no era de alcance a la presente investigación por el tiempo que conlleva realizar más ensayos a tiempos menores y tomando en cuenta el alcance del estudio, sin embargo se recomienda continuar con el estudio planteando todas estas nuevas hipótesis de trabajo.

En otra investigación se analizaron diferentes periodos de reactivación (0,2,4,6 y 24 horas) después de recibir una irradiación de un reactor UV de lámpara de baja presión y alta intensidad, la fotorreactivación se dio solo dos tiempos, siendo mayor de 4 horas, con un porcentaje de reactivación de 27,8%, en caso de reactivación en oscuridad fue nula en todos los periodos de tiempo (González Ortiz 2019).

Sin embargo, todas las investigaciones que se han realizado hasta la actualidad se han enfocado en periodos de tiempos de reactivación muy cortos, no se han realizados ensayos experimentales en tiempos más largos, como los que se realizó al quinto día, no se puede comparar con los demás estudios, al parecer estas investigaciones demuestran que puede existir reactivación en periodos de tiempo cortos, en horas, o poco más, al parecer las bacterias a paso de los días se vuelven a inactivar.

## CAPÍTULO VI

### 6. Conclusiones

Esta investigación ha resultado muy interesante permitiendo comprender el comportamiento de las bacterias frente a la luz ultravioleta, se ha demostrado que la luz ultravioleta tiene una gran efectividad, requiere un tiempo muy corto para desactivar bacterias presentes en el agua residual.

Se logró inactivar 2,68 unidades logarítmicas de *Escherichia Coli* ATCC 8739 con una dosis UV de 28,50 (mJ/cm<sup>2</sup>), siendo esta la mayor tasa de inactivación conseguida durante los ensayos experimentales, en cambio con una dosis UV de 9,30 (mJ/cm<sup>2</sup>) se obtiene una mínima tasa de inactivación de 0,70 unidades logarítmicas.

Los ensayos experimentales de reactivación revelan que la cepa *Escherichia coli* ATCC 8739 no tiene la capacidad de fotorreactivación en periodo de tiempos largos, se concluye que debe realizar un diseño experimental en rangos de tiempos más largos hasta llegar a los cinco días.

Las curvas de supervivencia obtenidas difieren de la forma lineal. Por ello el ajuste se realizó con modelos matemáticos no-lineales frecuentemente usados en estudios de inactivación: Log-lineal clásico, Log-lineal + hombro y Bifásico. Este último es el que presentó la mejor bondad de ajuste y validación, por lo que es considerado como un modelo predictivo adecuado para describir las curvas de inactivación de la presente investigación, reformulando los parámetros determinados con los valores de los ensayos realizados.

## CAPÍTULO VII

### 7. Recomendaciones

- Se recomienda utilizar filtros de papel que tenga mayor capacidad de retención de partículas presentes en el agua contaminada, esto facilita el proceso de desinfección UV y evita problemas posteriores, principalmente en los filtros millipore.
- Dependiendo del agua a desinfectar, cada cierto tiempo, se recomienda limpiar los componentes de la lámpara, ya que en su interior se produce el mecanismo de destrucción de virus, bacterias, entre otros microbios.
- Todo el material de laboratorio utilizado para el ensayo de tesis debe estar limpio, auto clavado, o puesto en luz UV, esto permite que los resultados sean más exactos.
- Existe diferentes tipos de medios de cultivos, el nutriente que contiene depende su desarrollo, hay medios de cultivos que permite que el crecimiento de bacterias, pero para que se desarrollen colonias de *Escherichia coli* en membranas (filtros millipore) se recomienda agar cromogénico, y si es posible que permite el desarrollo de un solo tipo de colonias.
- Se recomienda utilizar membranas de filtración según las especificaciones del medio de cultivo, el tipo de membrana empleada afectara el crecimiento y coloración de la bacteria.
- Se recomienda continuar con la investigación para evaluar qué pasa con los procesos de reactivación, en este caso no se pudo abordar en profundidad por la limitante del tiempo.

## CAPÍTULO III

### 8. Bibliografías

- Abbaszadegan, Morteza, Michaela N. Hasan, Charles P. Gerba, Peter F. Roessler, Barth R. Wilson, Roy Kuennen, and Eric Van Dellen. 1997. “The Disinfection Efficacy of a Point-of-Use Water Treatment System against Bacterial, Viral and Protozoan Waterborne Pathogens.” *Water Research* 31 (3): 574–82. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00263-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00263-1).
- Aguirre García, Juan Salvador. 2012. “Variabilidad de La Inactivación Microbiana y de La Fase de Latencia de Los Microorganismos Supervivientes a Diferentes Tratamientos Conservantes de Alimentos.” UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID. <http://marefateadyan.nashriyat.ir/node/150>.
- Aguirre, Paula, Joan García, and Rafael Sahuquillo. 2004. “Desinfección Con Cloro y Luz UV En Un Proceso Convencional de Regeneración de Agua” 11 (1): 75. <https://doi.org/10.4995/ia.2004.2524>.
- America Water Treatment. 2013. “Sistema Ultravioleta. Acero Inoxidable.” Ficha Tecnica. 2013.
- Asensi, E., E. Alemany, P. Duque-Sarango, and D. Aguado. 2019. “Assessment and Modelling of the Effect of Precipitated Ferric Chloride Addition on the Activated Sludge Settling Properties.” *Chemical Engineering Research and Design* 150: 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.07.018>.
- ATCC, American Type Culture Collection. 2013. “Escherichia Coli (ATCC 8739),” 1–2. [www.atcc.org](http://www.atcc.org).
- Becton Dickinson BD. 2013. “EMB Agar ( Eosin Methylene Blue Agar ), Modified.” *Instituciones de Uso-Medio En Placas Listo Para Su Uso*, no. April: 2–4.

<https://www.bd.com/resource.aspx%3FIDX%3D8765>.

Beltrán, Norma, and Blanca Jiménez. 2000. “Eficiencia De La Luz Ultravioleta Para La Desinfección De Agua Residual Con Alto Contenido De Patógenos,” no. January 2015: 1–3.

<https://www.researchgate.net/publication/267789004>.

Benitez Rodas, Gilberto Antonio. 2013. “Análisis y Modelización de La Inactivación de Escherichia Coli En Aguas Residuales” 1 (1): 227. <http://eprints.ucm.es/22907/1/T34742.pdf>.

Benvenuto Vargas, Verónica Patricia. 2017. “Determinación de Escherichia Coli Enteropatógena (ECEP) En Agua de Mar Del Circuito de Playas de La Costa Verde.” UNIVERSIDAD RICARDO PALMA. <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/urp/1016>.

Binder. 2015. “Productos BINDER - Cámara Climática, Cámara de Secado, Incubadora.” 2015. <https://www.binder-world.com/es/productos>.

Brenes, Roberto, and Luis Francisco Rojas. 2005. “El Agua: Sus Propiedades y Su Importancia Biológica.,” no. 37: 167–96. <http://revista.uaca.ac.cr/index.php/actas/article/view/407>.

Bretas, Fernando, Guillermo Casanova, Thomas Crisman, Antonio Embid, Liber Martin, Fernando Miralles, and Raul Muñoz. 2020. “Agua Para El Futuro: Estrategia de Seguridad Hídrica Para América Latina y El Caribe (Anexos).” *Agua Para El Futuro: Estrategia de Seguridad Hídrica Para América Latina y El Caribe (Anexos)*. <https://doi.org/10.18235/0002818>.

Byrns, George, Beverly Barham, Liangcheng Yang, Kathryn Webster, George Rutherford, Garrett Steiner, Daniel Petras, and Michele Scannell. 2021. “Usos y Limitaciones de La Lámpara Ultravioleta Germicida Portátil Para La Desinfección de Superficies.” *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 18 (S1): S75–85. <https://doi.org/10.1080/15459624.2021.1877057>.

- CENTA, Secretario de Alianza por el agua / Ecología y Agua. 2008. “Manual de Depuración de Aguas Residuales Urbanas,” 264. <http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>.
- Cerdá, Emilio, Manuel Velazquez, Héctor Sorribes, Alex Poulussen, Fernando Magdaleno, Elena López, and Elisa Vargas. 1993. “El Agua En España: Economía y Gobernanza.” *Journal of Economic Literature* 31 (1): 1–278. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=9305126391&lang=es&site=ehost-live>.
- Chantal, Danilecamps, Alistair Rieu Clarke, Sonja Koeppel, Nataliya Nikiforova, and Naciones Unidas. 2019. “Informe Mundial de Las Naciones Unidas Sobre El Desarrollo de Los Recursos Hídricos 2019.” *UNESCO “Organización de Las Naciones Unidas Para La Educación, La Ciencia y La Cultura,”* 2019. <http://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2019/>.
- Chris. 2015. “El Espectro de Bacterias Ligeras.” 2015. <https://biology.stackexchange.com/questions/39049/can-microorganisms-e-g-bacteria-be-damaged-or-killed-by-253-7-nm-light>.
- Córdoba, Maria Alejandra, Valeria Fernanda Del Coco, and Juan Juan Angel Basualdo. 2010. “Agua y Salud Humana.” *Química Viva* 9 (3): 105–19.
- Croxen, Matthew A., Robyn J. Law, Roland Scholz, Kristie M. Keeney, Marta Wlodarska, and Brett Finlay. 2013. “Recent Advances in Understanding Enteric Pathogenic Escherichia Coli.” *Clinical Microbiology Reviews*. <https://doi.org/10.1128/CMR.00022-13>.
- Duque-sarango, Paola, Ana Cando, Fabiola Segarra, and Anderson Zhingri. 2018. “Reducción de

Aluminio y Huevos de Helminto Contenidos En Fangos Deshidratados de Una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Con Procesos Electroquímicos.” *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología* 7 (3): 172–83.

Duque-Sarango, Paola Jackeline, and Luis Víctor Chinchay-Rojas. 2008. “Diagnóstico Ambiental En Tres Mataderos de Ganado En La Provincia de Loja y Diseño Del Plan de Manejo Ambiental.” UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.

Duque, Sarango, and Bolivar Hernández. 2020. “Estudio Integral Del Recurso Hídrico de La Microcuenca Del Rio Guarango , Cuenca – Ecuador.” *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação Iberian Journal of Information Systems and Technologie*, 240–52.

Duque Sarango, Paola, Daysi M. Patiño, and Xavier E. Lopez. 2019. “Evaluación Del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS Para La Simulación Hidrológica de Una Microcuenca Andina Tropical.” *Información Tecnológica* 30 (6): 351–62. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000600351>.

Enriquez, Evangelina Olivas, Juan Flores Margez, Monica Serrano Alaminio, Eréndira Soto Mejía, Jaime Iglesias Olivas, Enrique Salazar Sosa, and Manuel Fortis Hernández. 2011. “Fecal Indicators and Pathogens in Water Discharged into the Rio Grande.” *Terra Lationoamericana* 29 (4): 1–10.

Escalante, V, L Cardoso, E Ramírez, G Moeller, G Mantilla, J Montecillos, C Servín, and F Villavicencio. 2003. “EL REUSO DEL AGUA RESIDUAL TRATADA EN MEXICO,” 230–36.

Espigares, Garcia. M, and J. A Pérez. 1985. “Aspectos Sanitarios Del Estudio de Las Aguas.”

*Servicio de Publicaciones Granada.*, 22.

Espinoza, Daniel Andrés, and Tatiana Carolina Zumba. 2018. “Estudio Del Impacto Ambiental En La Calidad Del Agua Del Río Cuenca Producido Por La Descarga Del Efluente de La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba.” Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/30325/1/3.Trabajo-de-titulacion.pdf>.

Esponda Aguilar, Pedro Luis. 2001. “Arranque de Un Sistema Experimental de Flujo Vertical a Escala Piloto de Tipo Humedal Artificial Para El Tratamiento de Aguas Residuales.” 100.

Estrada Ramirez, Juan Carlos, Saúl Uriel Corona Bautista, and Mario Pedraza Reyes. 2016. “SOBREEXPRESIÓN HOMÓLOGA Y HETERÓLOGA DE LA DNA FOTOLIASA DE ESCHERICHIA COLI.” *Jóvenes En La Ciencia* 2 (1): 405–9.

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2017. “Escasez de Agua: Uno de Los Grandes Retos de Nuestro Tiempo.” 2017. <http://www.fao.org/zhc/detail-events/es/c/880888/>.

Ferrario, Mariana, and Sandra Guerrero. 2016. “Study of the Inactivation of Spoilage Microorganisms in Apple and Melon Juices by Pulsed Light and Ultrasound.” *Revista Del Laboratorio Tecnológico Del Uruguay*. Buenos Aires, Argentina. <http://ojs.latu.org.uy/>.

Godoy Sierra, Katerine. 2015. “EVALUACIÓN DEL GRADO DE INHIBICIÓN DE TANINOS PRESENTES EN TRES VARIEDADES DE UVA SOBRE Escherichia Coli PARA SU USO EN LA DESINFECCIÓN DE AGUA CRUDA.” *PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE CIENCIAS CARRERA DE MICROBIOLOGIA INDUSTRIAL*, no. 40: 1–27.

González-Cabrera, Odonel, Taimi Ruiz-Pérez, Mirelys Claro-Pérez, Nancy María Pérez-Pino,

- Grisel Pérez-Gálvez, and Lisbey Collazo-Alfonso. 2014. "A Study of Patenting on Water and Wastewater Treatment Technologies" 26 (3): 339–47. <https://doi.org/10.1590/0103-37862014000300010>.
- González Ortiz, Yenifer. 2019. "Evaluación Del Comportamiento de Un Sistema Uv Para Desinfección de Un Efluente Que Proviene de Un Humedal Construido." Universidad de Concepción.
- González Perez, Dante. 2017. "Tratamiento Ultravioleta Del Agua a Escala Doméstica: Sistema de Desinfección Solar Usando La Óptica Anidólica." Universidad Politécnica de Cataluña. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/108440>.
- Guadarrama Brito, María E., and Antonina Galván Fernández. 2015. "Impact of Wastewater Use in Agriculture." *Revista Iberoamericana de Las Ciencias Biológicas y Agropecuarias* 4 (7): 23. <https://doi.org/10.23913/ciba.v4i7.29>.
- Guimarães, Jose Roberto, Jorge Ibáñez, Marta. I. Litter, and Ramón Pizarro. 2001. "DESINFECCIÓN DE AGUA," 375–88.
- Herdiana. 2010. "Tratamiento de Aguas Lastres a Través de Procesos de Desinfección UV." *Journal of Chemical Information and Modeling* 53 (9): 1–65. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Hijnen, W. A.M., E. F. Beerendonk, and G. J. Medema. 2006. "Inactivation Credit of UV Radiation for Viruses, Bacteria and Protozoan (Oo)Cysts in Water: A Review." *Water Research* 40 (1): 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.10.030>.
- Jácome, Samuel. 2008. "DETERMINACIÓN DE CINÉTICAS DE INACTIVACIÓN DE ESCHERICHIA COLI CECT 433 INOCULADA EN MEDIO DE REFERENCIA POR

TRATAMIENTOS CON ALTAS PRESIONES HIDROSTÁTICAS.” *Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos*. Universidad Politecnica de Valencia.

Josep. 2009. “Luz Ultravioleta: Rayos Que Matan.” AQUAFLASH. 2009. <http://aquaflash.blogspot.com/2009/04/34-luz-ultravioleta-tratamiento.html>.

KU Leuven. 2016. “GInaFiT.” Institución de investigación educación con atractivo internacional. <https://frisbeetool.eu/GInaFit/What-is-GInaFiT.html>.

Lara Oviedo, Gustavo Andrés, Maria Camila Navarro, and Jean Atencio Altamiranda. 2018. “Estudio de Fotoreactivación En Cultivos Microbiológicos Obtenidos de Carga Microbiana de La Superficie de Fresas Sometidas a Diferentes Dosis de Luz Ultra Violeta de Onda Corta UV-C.” *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales* 5 (1): 40. <https://doi.org/10.23850/24220582.1148>.

Larios, Fernando, Carlos González, and Yennyfer Morales. 2015. “Las Aguas Residuales y Sus Consecuencias En El Perú.” *Revista de La Facultad de Ingeniería de La USIL* 2 (1991): 1–18. <http://revistas.usil.edu.pe/index.php/syh/article/view/115>.

Lema, Angel, Luis Morales, and J Rosales. 2015. “Diseño e Implementación de Un Sistema Automático de Purificación de Agua Por Medio de Energía, Reflexión Solar, y Luz Ultravioleta” 1 (May 2015): 11. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10492>.

Leon, Marcelo, Maritza Ruíz, Lídice Haz, Robert Montalvan, Viviana Pinos Medrano, and Silvia Medina Anchundia. 2018. “Water Treatment Monitoring System at San Jose de Chaltura, Imbabura - Ecuador.” *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 10963 LNCS: 610–24. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95171-3\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95171-3_48).

- León, R, Beatriz Margarita Pernía Santos, Rosa Siguencia, S Franco, A Noboa, and Xavier Cornejo. 2018. “Potencial de Plantas Acuáticas Para La Remoción de Coliformes Totales y Escherichia Coli En Aguas Servidas.” *Enfoque UTE* 9 (4): 131–44. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n4.286>.
- López Torres, Diego Santiago. 2005. “TRATAMIENTO DE AGUA PARA EL CONSUMO HUMANO CON RADIACIÓN UV, PARA LA INACTIVACIÓN DE COLIFORMES.” Universidad Técnica De Ambato.
- Lorenzo, Eliet, Jose Guadalupe Llanes, Lidia Asela Fernandez, and Mayra Bataller. 2009. “Reúso de Aguas Residuales Domésticas Para Riego Agrícola. Valoración Crítica.” *Centro Nacional de Investigaciones Científicas Cuba. Revista CENIC. Ciencias Biológicas* 40: 11.
- Malpartida Campos, Analy Mireilla. 2020. “REMOCIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS EN EFLUENTES PROVENIENTES DE LOS CAMALES.” *UNIVERSIDAD CIENTIFICA*, 1–31. <http://repositorio.cientifica.edu.pe:8080/handle/UCS/710>.
- Manga, J, Nury Logreira, and J Serralt. 2001. “Reusó de Aguas Residuales: Un Recurso Hídrico Disponible.” *INGENIERIA*, 12–21. <https://www.redalyc.org/pdf/852/85200902.pdf>.
- Martínez, Marcelo, and Andrés Osorio. 2018. “Validation of a Method for Real Color Analysis in Water.” *Facultad de Ciencias* 7 (1): 143–55. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rfc/article/view/68086>.
- Mendiara, Sarah. 2013. “Inactivación de Escherichia Coli Presente En Aguas de Salida de Depuradora Mediante Cloración y Procesos de Oxidación.” Universidad Zaragoza.
- Merck Millipore. 2014. “Chromocult Agar Para Coliformes.” *Darmstadt*, 1–4. [http://www.merckmillipore.com/INTL/en/product/Chromocult-Coliform-Agar,MM\\_NF-](http://www.merckmillipore.com/INTL/en/product/Chromocult-Coliform-Agar,MM_NF-)

C164546?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F.

- Millán, Dionelys, Lucía Romero, Marbella Brito, and Ana Ramos. 2015. "Ultraviolet Light : Microbial Inactivation on Fruits." *SABER. Revista Multidisciplinaria Del Consejo de Investigación de La Universidad de Oriente* 27 (3): 454–69. <http://www.redalyc.org/pdf/4277/427743080011.pdf>.
- Mine, Vector. n.d. "Las Bacterias De E Coli, Corte Transversal." Accessed April 23, 2021. <https://es.dreamstime.com/las-bacterias-de-e-coli-corte-transversal-biológico-micro-del-ejemplo-vector-etiquetaron-el-diagrama-cartel-la-información-image116298639>.
- Monroy, Jesus Rodríguez, and Carmen Durán de Bazúa. 2006. "Remoción de Nitrógeno En Un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Usando Humedales Artificiales de Flujo Vertical a Escala de Banco." *Tecnología, Ciencia, Educación* 21: 25–33. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48221104%0ACómo>.
- Montalvo-Ochoa, F., V. Robles-Bykbaev, P. Duque-Sarango, and K. Gonzalez-Arias. 2020. "An Educational Rule-Based Expert System to Determine Water Quality for Environmental Engineering and Biotechnology Students." *EDUNINE 2020 - 4th IEEE World Engineering Education Conference: The Challenges of Education in Engineering, Computing and Technology without Exclusions: Innovation in the Era of the Industrial Revolution 4.0, Proceedings*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EDUNINE48860.2020.9149502>.
- Onkundi Nyangaresi, Paul, Yi Qin, Guolong Chen, Baoping Zhang, Yinghua Lu, and Liang Shen. 2018. "Effects of Single and Combined UV-LEDs on Inactivation and Subsequent Reactivation of E. Coli in Water Disinfection." *Water Research* 147: 331–41. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.014>.

- ONU, Organización de las Naciones Unidas. 2019. “Mejorar El Tratamiento de Aguas Residuales Es Crucial Para La Salud Humana y Los Ecosistemas.” 2019. <https://www.mexicoambiental.com/mejorar-el-tratamiento-de-aguas-residuales-es-crucial-para-la-salud-humana-y-los-ecosistemas/>.
- OPS, Organización Panamericana de la Salud. 2021. “Agua y Saneamiento.” 2021. <https://www.paho.org/es/temas/agua-saneamiento>.
- Osorio, N W. 2012. “PH DEL SUELO Y DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES” 1 (4): 1–4. [http://www.walterosorio.net/web/sites/default/files/documentos/pdf/1\\_4\\_pH\\_del\\_suelo\\_y\\_nutrientes\\_0.pdf](http://www.walterosorio.net/web/sites/default/files/documentos/pdf/1_4_pH_del_suelo_y_nutrientes_0.pdf).
- Pérez Castillo, Harold. 2008. “Acciones Desinfectantes En La Potabilizacion Del Agua En Pequeñas Comunidades.” Universidad de Sucre.
- Ramírez Arias, Yazmin Lorena. 2013. “Diseño, Construcción y Puesta En Marcha de Un Reactor Tubular Fotocatalítico (UV-A) Para La Degradación de Desechos Químicos Orgánicos.” UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.
- Ramírez Santos, Jesús, Gabriel Contreras Ferrat, and M. Carmen Gómez Eichelmann. 2005. “La Fase Estacionaria En La Bacteria Escherichia Coli.” *Revista Latinoamericana de Microbiología* 47 (3–4): 92–101.
- Ricardo, Rojas. 2002. “Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Preparado.” In , edited by Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente and Organización Mundial de la Salud Ambiente, División de Salud y Ambiente, Organización Panamericana de la Salud, 58:1–19. <https://doi.org/10.1128/AAC.03728-14>.
- Rodríguez-Angeles, Martha Guadalupe. 2002. “Principales Características y Diagnóstico de Los

Grupos Patógenos de Escherichia Coli.” *Salud Publica de Mexico* 44 (5): 464–75.  
<https://doi.org/10.1590/s0036-36342002000500011>.

Rodriguez, Diego, Hector Serrano, Ana Delgado, Daniel Nolasco, and Gustavo Saltiel. 2014. “De Residuo a Recurso: Residuos Agrícolas,” 63.

Roldan Fonseca, Katya Melissa. 2019. “Eficiencia de Lámparas de Rayos Ultravioleta En La Disminución de Coliformes Termotolerantes Del Efluente de La PTAR Lagunas de San José - Chiclayo.” Universidad Nacional de Trujillo. Área de Ciencias Biológicas.  
[http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/14465/Aguilar Ramos Cesar Hilton.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/14465/Aguilar_Ramos_Cesar_Hilton.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Romeo Calderón, Landy Grabiél. 2014. “Diseño y Construcción Del Prototipo En Línea de Un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales a Base de Luz Ultravioleta.” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7256/1/UPS-CT004152.pdf>.

Romero-Martínez, Leonardo, Paola Duque-Sarango, Asunción Acevedo-Merino, and Enrique Nebot. 2019. “Comparing the Inactivating Efficacy of Enteric Bacteria in Seawater Treated with Different Configurations of Continuous Flow-through Ultraviolet Devices: Single-Pass and Recirculation.” *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 94 (9): 2980–89.  
<https://doi.org/10.1002/jctb.6108>.

Romero Martínez, Leonardo. 2015. “TECNOLOGÍAS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS DE LASTRE MEDIANTE PROCESOS FOTOQUÍMICOS: DISEÑO, EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN.” UNIVERSIDAD DE CÁDIZ.

Romeu Alvarez, Beatriz. 2012. “Caracterización de Cepas de Escherichia Coli de Importancia

Clínica Humana Aisladas de Ecosistemas Dulceacuícolas de La Habana.” *Repositorio de Tesis Universidad de La Habana*, 1–98.

Rompere, Annie., Pierre. Servais, Julia Baudart, Marie. Renee de Roubin, and Patrick. Laurent. 2010. “Detection and Enumeration of Coliforms in Drinking Water: Current Methods and Emerging Approaches.” *Journal of the Formosan Medical Association* 109 (2): 106–12. [https://doi.org/10.1016/S0929-6646\(10\)60030-7](https://doi.org/10.1016/S0929-6646(10)60030-7).

Rossel, Luis Jhordan, Luis Alberto Rossel, Félix Pompeyo Ferro, and Ana Lucia Gonzales. 2014. “Radiación Ultravioleta-c Para Desinfección Bacteriana (Coliformes Totales y Termotolerantes) En El Tratamiento de Agua Potable Radiation.” *Revista de Investigaciones Altoandinas* 22 (1): 68–77. <http://www.scielo.org.pe/pdf/ria/v22n1/2313-2957-ria-22-01-68.pdf>.

Solís, Yuliana, Luis Alvarado Zúñiga, and Danner Mora. 2018. “La Conductividad Como Parámetro Predictivo de La Dureza Del Agua En Pozos y Nacientes de Costa Rica.” *Revista Tecnología En Marcha* 31 (1): 35. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>.

Tarrán, Elio Pietrobon. 2006. “Desinfección Por Luz Ultravioleta.” *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana* 40 (4): 553–60.

Trojan Technologies. 2020. “TECNOLOGÍA DE LÁMPARAS UV.” Aquafine. 2020.

UNE, Asociación Española de Normalización. 2019. “Norma Española. UNE-EN ISO 8199.,” 1–5.

UNICEF, WHO. 2017. *Informe Anual*. Edited by UNICEF. *Informe Anual de UNICEF 2017*. UNICEF. [http://www.extranjeria.gob.cl/filesapp/Informe Estimacion Poblacion Extranjeros 2017.pdf](http://www.extranjeria.gob.cl/filesapp/Informe%20Estimacion%20Poblacion%20Extranjeros%202017.pdf).

Valdés Holguín, Nidia Johana. 2018. “Revisión Del Uso de La Luz Ultravioleta Como Alternativa Agroindustrial y Ambiental Al Uso de Agua Clorada.” Universidad Nacional de Colombia Facultad. <http://bdigital.unal.edu.co/64752/1/1113643492.2018.pdf>.

Véliz Ubilla, Lucía Lisseth. 2014. “PROPUESTA DE DESINFECCIÓN DEL AGUA DE CONSUMO DIARIO POR MEDIO DE LÁMPARAS DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA (UV) EN LA COMUNA LAS ROSAS PERTENECIENTE AL CANTÓN PALLATANGA DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO.” *Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial* 1 (1): 137.

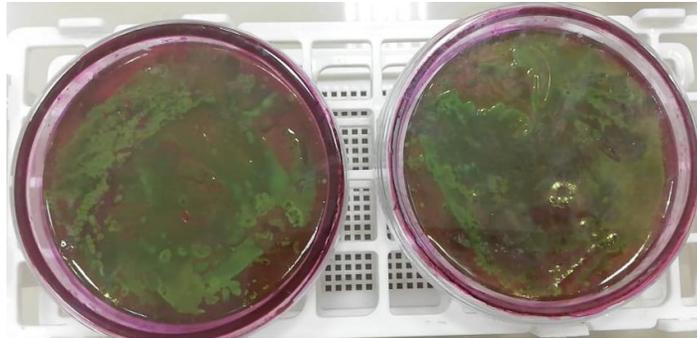
Wiki. 2007. *Ingeniería de Aguas Residuales*. Edited by Wiki. <https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/ereader/bibliotecaups/35813>.

Wright, H.B, and W.L Cairns. 1996. “DESINFECCION DE AGUA POR MEDIO DE LUZ ULTRAVIOLETA.” *Trojan Technologies Inc.*, 1–28.

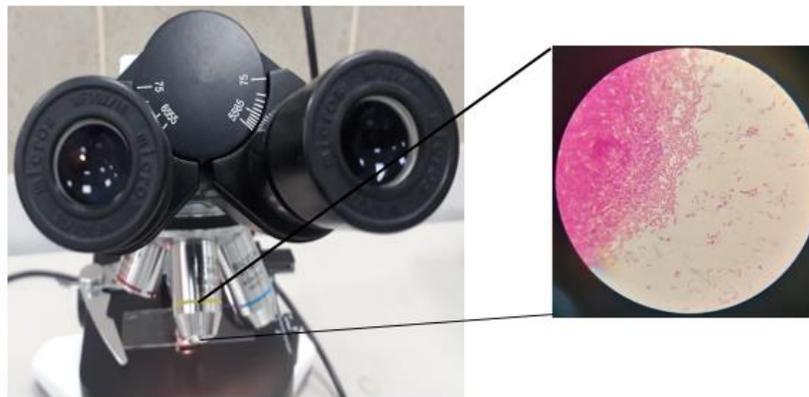
## CAPÍTULO IX

### 9. Anexos:

#### Pruebas Bioquímicas a la Cepa E. coli ATCC 8739



**Imagen A.** Crecimiento de la cepa E coli ATC 8739 en agar E.M.B.  
Fuente: Propio Autor.



**Imagen B.** Pruebas químicas, **Tinción de Gram** realizado a la cepa E. coli ATCC 8739.  
Fuente: Propio Autor.

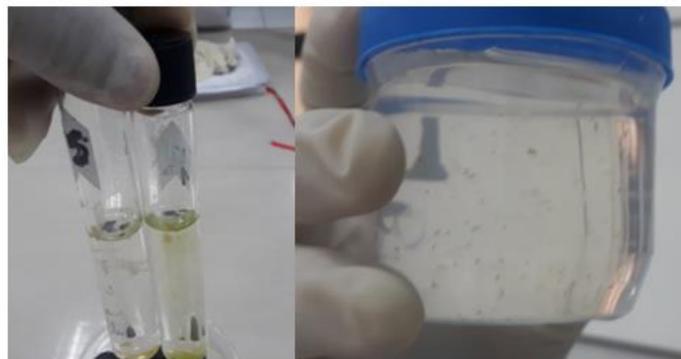


**Imagen C.** Caldo nutritivo para la propagación de la cepa *Escherichia coli* ATCC 8739.  
Fuente: Propio Autor.



**Imagen D.** Reactivos empleados para realizar la prueba bioquímica: tensión gram.  
Fuente: Propio Autor.

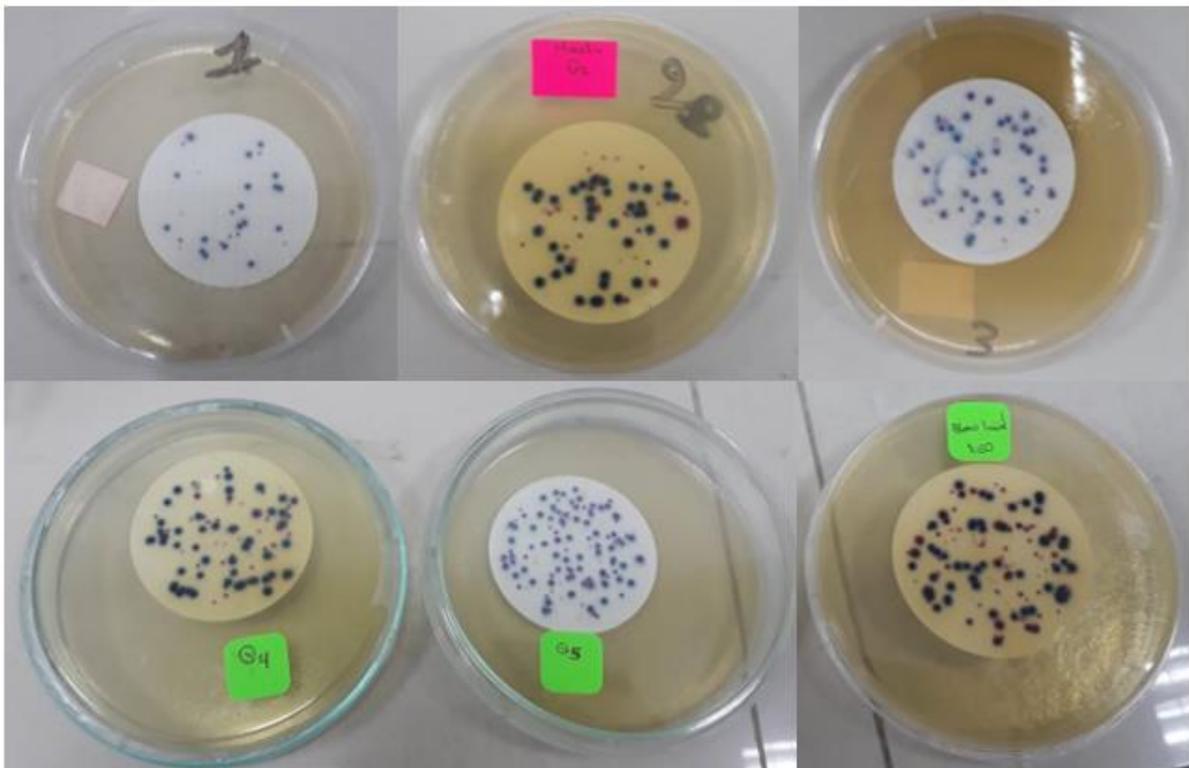
### Reactivación de la Bacteria Certificada



**Imagen F.** Formación de algas en el agua residual almacenado en Cámara Binder.  
Fuente: Propio Autor.



**Imagen G.** Normas bioseguridad empleado en el trabajo.  
Fuente: Propio Autor.

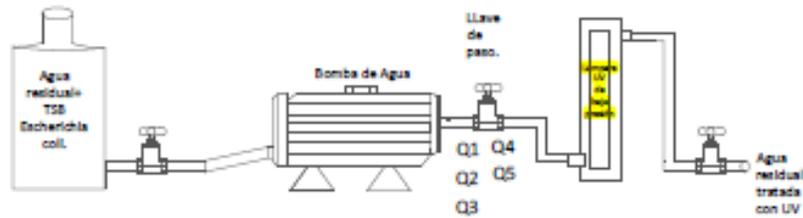


**Imagen H.** Formación de colonias de Escherichia coli.  
Fuente: Propio Autor.



**Imágenes I:** Recuento de las colonias en el equipo contador de colonias.  
Fuente: Propio Autor.

**Reactor Tubular de Lámpara de Baja Presión. Dosis UV ctte**



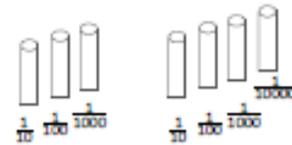
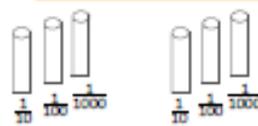
**Muestra de Agua Residual Tratada con Luz UV**



1 ml muestra agua tratada

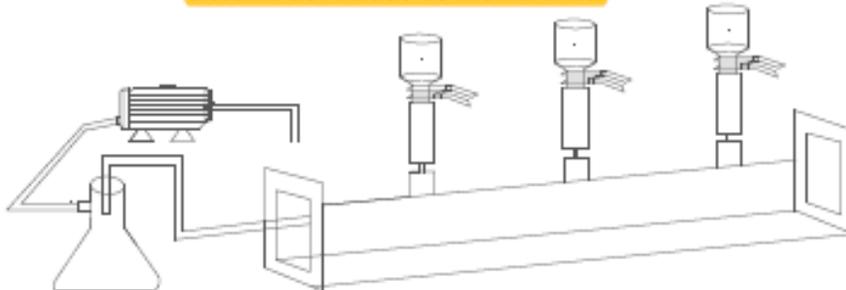


**Disoluciones de la Muestras**

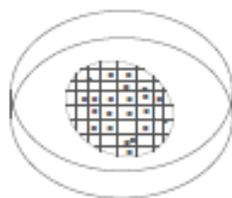


9 ml agua destilada

**Sistema de Filtrado de Membranas.**



**Ubicación de los Filtros de Membrana Millipore en Cajas Petri.**



35°C a 37°C

NORMA: (UNE-EN ISO 8199; 2008);

10 a 200 Colonias

**Ilustración A.** Esquema: Construcción del reactor experimental UV, Recolección de las muestras, Disoluciones de la misma, Filtración en membrana y Recuento de colonias

**Fuente:** Propio Autor.