

151015

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN  
CRISTÓBAL DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y  
METALURGIA**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN**

**PROGRAMA: INVESTIGACIONES EN PROCESOS  
INDUSTRIALES**

**ÁREA DE PROTECCIÓN Y CONTROL AMBIENTAL**



**Informe Final**

**DESINFECCIÓN DEL EFLUENTE SECUNDARIO DE LA  
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE  
AYACUCHO MEDIANTE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA CON  
FINES DE MEJORAR SU CALIDAD**

**RESPONSABLE** : Raúl Ricardo VÉLIZ FLORES

**MIEMBROS** : Edgar Gregorio ARONÉS MEDINA  
: Ybar Gustavo PALOMINO MALPARTIDA

**AYACUCHO - PERÚ**

**2015**

## **RESUMEN**

El principal objetivo de la investigación fue realizar procesos de desinfección con radiación ultravioleta al agua tratada del efluente secundario de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Totora de Ayacucho y comparar los resultados con los que obtiene la Planta Totora en cuanto a microorganismos patógenos según las normas peruanas sobre vertidos de efluente y concluir si existe algún grado de mejoramiento del agua para riego agrícola.

Se realizaron dos tipos de pruebas experimentales para la desinfección UV, primero con agua del efluente secundario sin filtración y segundo con agua filtrada. Las pruebas de desinfección sin filtración, presentó poca eficiencia en cuanto a la remoción de microorganismos, 54628 NMP/100 ml, no alcanzando la calidad sanitaria para riego de vegetales, según los límites máximos permisibles del D.S. 002-2008-MINAM.

Las pruebas experimentales de desinfección UV con agua filtrada mediante dos filtros instalados en serie el primero de sedimentación y el segundo de carbón activado mejoró notablemente la eficiencia de la desinfección y reducción de microorganismos patógenos, 81 NMP/100 ml, cumpliendo el agua desinfectada con los estándares de instituciones como la EPA, OMS y de la norma peruana mencionada líneas arriba que exige 1000 y 2000 NMP/100 ml de microorganismos patógenos como límite máximo permisible para agua de riego de vegetales de tallo bajo y alto respectivamente. Por consiguiente con el segundo método de desinfección se obtuvo agua de buena calidad sanitaria que se puede reutilizar para riego agrícola sin restricciones.

El trabajo de investigación concluye que esta técnica de desinfección es una buena alternativa de solución para el proceso de desinfección del agua del efluente secundario de la Planta Totorá utilizando el segundo método de desinfección UV, método que mejora la remoción de microorganismos y calidad del agua, permitiendo la reutilización de la misma para riego agrícola sin restricciones, pero haciendo hincapié que debe implementarse previamente un proceso terciario de filtración.

**Palabras claves:** Desinfección UV; radiación UV; calidad de agua agrícola; PTAR; diseño de proceso.

## SUMMARY

The main objective of the research was conducted disinfection processes with ultraviolet radiation to the treated water from secondary effluent treatment plant Wastewater Totora Ayacucho and compare the results with those obtained by the Totora plant as pathogenic microorganisms according to the rules Peruvian effluent discharges and on to conclude whether there is some degree of improvement of water for agricultural irrigation.

Two types of experimental tests for UV disinfection, the first secondary effluent water without filtration and second filtered water were made. The disinfection tests without filtration showed little efficiency in terms of removal of microorganisms, 54,628 MPN / 100 ml and not reaching the sanitary quality for irrigating as the maximum permissible limits of D.S. 002-2008-MINAM.

Experimental tests UV disinfection with water filtered by two filters installed in series the first sedimentation and the second activated carbon significantly improved disinfection efficiency and reduction of pathogens, 81 NMP / 100 ml, provided the water disinfected with standards institutions such as the EPA, WHO and the Peruvian above mentioned standard lines required 1000 and 2000 NMP / 100 ml of pathogens as the maximum permissible limit for water irrigating low and high respectively stem. Therefore the second method of disinfecting water of good sanitary quality that can be reused for agricultural irrigation unrestricted was obtained.

The research concludes that this disinfection technique is a good alternative solution

for process water disinfection secondary effluent from the Totorá plant using the second method of UV disinfection method which improves the removal of microorganisms and water quality, allowing the reuse of it for irrigation without restrictions, but stressing that must already implemented a tertiary filtration process.

**Key words:** UV disinfection; UV radiation; agricultural water quality; WWTP; design process.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>ii</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>iv</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	
2.1 Antecedentes	5
2.2 Aspectos normativos legales	8
2.2.1 Marco legal del agua, uso, contaminación y tratamiento	8
2.2.2 Norma legal sobre la reutilización del agua residual	9
2.3 Procesos de desinfección del agua residual tratada	11
2.3.1 Tecnologías de desinfección	12
2.3.2 Microorganismos patógenos en el agua residual tratada	13
2.4 Desinfección del agua residual tratada mediante radiación UV	13
2.4.1 Espectro electromagnético, energía y radiación UV	14
2.4.2 Radiación UV	16
2.4.2.1 Ventajas	18
2.4.2.2 Desventajas	19
2.4.3 Mecanismo de acción de la radiación UV durante la desinfección	19

2.4.3.1	Material genético microbiano	20
2.4.3.2	Efecto de la radiación UV al ADN	20
2.4.4	Modelamiento matemático	22
2.4.4.1	Ley de Chick	23
2.4.4.2	Intensidad de la radiación UV	24
2.4.5	Principios básicos de óptica y radiación UV	25
2.5	Desinfección de aguas residuales mediante cloro	27
2.5.1	Ventajas y desventajas	28
2.5.2	Posibilidad de generar subproductos tóxicos	28
2.5.3	Efecto sobre la salud humana y ambiental	29

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1	Descripción de la PTAR Totorá de Ayacucho	30
3.2	Materiales, aparatos y equipos	32
3.3	Metodología del proceso de desinfección UV	34
3.3.1	Caracterización del efluente secundario para el proceso de desinfección	34
3.3.2	Variables registrables y unidades de medidas	36
3.3.3	Procedimiento para la desinfección UV	37
3.3.3.1	Parámetros microbiológicos	37
3.3.3.2	Parámetros físico-químicos	37
3.3.4	Descripción de la unidad piloto de desinfección UV	38
3.3.4.1	Tanque de almacenamiento	38
3.3.4.2	Bomba de alimentación	40
3.3.4.3	Reactor con lámpara UV para la desinfección	40
3.3.4.4	Equipo de filtración de sedimentación y carbón activado	42

3.3.5	Tiempo de retención hidráulica	44
3.3.5.1	Procedimiento	44
3.3.5.2	Ecuaciones	45
3.4	Metodología experimental del proceso de desinfección UV	46
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS</b>	
4.1	Tiempo y caudal promedio	50
4.2	Tiempo de retención hidráulica	51
4.3	Proceso de desinfección con radiación UV	52
4.3.1	Proceso de desinfección UV: agua efluente secundario sin filtración	53
4.3.1.1	Resultados de los análisis físico-químico y bacteriológico: proceso de desinfección UV, sin filtración	53
4.3.1.2	Remoción de coliformes fecales	53
4.3.1.3	TRH necesario para la inactivación de coliformes fecales	54
4.3.1.4	Dosis necesaria para la inactivación de coliformes fecales	55
4.3.2	Proceso de desinfección UV: agua efluente secundario con filtración	58
4.3.2.1	Resultados de los análisis físico-químico y bacteriológico, agua efluente secundario y agua filtrada	58
4.3.2.2	Resultados de los análisis físico-químico y bacteriológico: proceso de desinfección UV con filtración	59
4.3.2.3	Remoción de coliformes fecales, proceso con filtración	59
4.3.2.4	TRH necesario para la inactivación de coliformes fecales	60
4.3.2.5	Dosis necesaria para la inactivación de coliformes fecales	62
4.3.2.6	Constante de velocidad de reacción	64



<b>V.</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	
5.1	Tiempo y caudal promedio	67
5.2	Tiempo de retención hidráulica	68
5.3	Proceso de desinfección con radiación UV	71
5.3.1	Proceso de desinfección UV: agua efluente secundario sin filtración	71
5.3.1.1	Resultados de los análisis físico-químico y bacteriológico: proceso de desinfección UV, sin filtración	71
5.3.1.2	Remoción de coliformes fecales	72
5.3.1.3	TRH necesario para la inactivación de coliformes fecales	73
5.3.1.4	Dosis necesaria para la inactivación de coliformes fecales	74
5.3.2	Proceso de desinfección UV: agua efluente secundario con filtración	77
5.3.2.1	Resultado de los análisis físico-químico y bacteriológico, antes y después de la filtración	77
5.3.2.2	Resultados de los análisis físico-químico y bacteriológico: proceso de desinfección UV con filtración	78
5.3.2.3	Remoción de coliformes fecales	79
5.3.2.4	TRH necesario para la inactivación de coliformes fecales	79
5.3.2.5	Dosis necesaria para la inactivación de coliformes fecales	80
5.3.2.6	Constante de velocidad de reacción	81
	<b>CONCLUSIONES</b>	82
	<b>RECOMENDACIONES</b>	84
	<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	85
	<b>APÉNDICE 1</b>	
	<b>CONTROL DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO AGUA RESIDUAL TOTORA-AYACUCHO</b>	90

## I. INTRODUCCIÓN

Los estudios de implementación de sistemas de tratamientos terciarios y desinfección de aguas tratadas en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) surgen de la necesidad de proteger al medio ambiente y evitar riesgos en la salud de los seres vivos, actualmente en todo el mundo se están realizando investigaciones orientadas a la reutilización de aguas residuales con la finalidad de satisfacer las demandas del vital líquido en el sector productivo en general y para riego agrícola en particular.

El problema del agua es de primordial importancia en la Región Ayacucho, región ubicada al sur del Perú que no cuenta con grandes recursos hídricos, el agua se hace cada vez más escasa para consumo humano, más aún para riego de áreas verdes y riego agrícola. La ciudad de Ayacucho no escapa de esta realidad, debido a las construcciones de nuevas viviendas por el aumento de la población que ha traído como consecuencia la expansión y desarrollo de nuevos parques, jardines y el incremento de la demanda de agua potable.

Cuando se reutilizan aguas residuales tratadas para procesos productivos o para riego agrícola especialmente para vegetales de tallo corto, el problema por lo

general es más de índole microbiológico que químico. Los brotes epidémicos que afectan a los animales y al ser humano, han estado siempre asociados a la reutilización de agua residual de efluentes tratados deficientemente sin la garantía o fiabilidad del caso o sin desinfectar.

Las verduras cosechadas de las tierras de cultivo de los valles de los ríos Alameda y Chacco, son comercializadas en los mercados de la ciudad de Ayacucho y consumidas por los ciudadanos huamanguinos, los microorganismos patógenos y los parásitos no se eliminan así se laven bien las verduras, por lo que el consumo de verduras crudas trae consigo que las personas se enfermen y parasiten, siendo el parasitismo uno de los factores de desnutrición y pobreza en Ayacucho.

La PTAR Totorá utiliza el método clásico de desinfección por cloro, en el año 2015 el agua del efluente desinfectada que salió de la PTAR y que llegó al río Alameda cumplió con la norma peruana de vertido de efluentes de plantas de tratamiento de agua residual, sobre todo en lo que se refiere a microorganismos patógenos, sin embargo como el agua es reutilizada para riego agrícola en muchos casos para riego de vegetales de tallo corto ésta no es apta para ese proceso, debido a que su calidad está por encima de los parámetros de los límites máximos permisibles que contiene la otra norma peruana para riego de vegetales de tallos cortos.

Cómo el agua del efluente de la planta Totorá no tiene la calidad para riego agrícola para vegetales de tallo corto, porque solamente cumple con la norma peruana de vertidos de efluentes, el efluente necesita un proceso de desinfección avanzado para disminuir la cantidad de microorganismos patógenos, tarea planteada en la presente investigación.

El proceso de desinfección por radiación ultravioleta (UV) es el proceso que se aplicó y estudió en la investigación, por ser un método fiable en términos técnicos, económicos, sociales y ambientales, proceso que elimina el 99.99 % de microorganismos patógenos, lo cual contribuirá a disminuir la contaminación del medio ambiente, los problemas de salud y beneficiará a la población campesina y urbana de la región en la producción agrícola.

La radiación UV es actualmente considerada como una de las mejores alternativas de desinfección de aguas residuales, ya que el sistema tradicional de cloración produce subproductos peligrosos tales como las cloraminas, los trihalometanos y otros compuestos orgánicos clorados que afectan la salud humana y al medio ambiente, **[Rodrigues, 1995]**. La radiación UV presenta muchas ventajas, no requiere la utilización de productos químicos, presenta fácil operación y manejo. Sin embargo, también presenta un inconveniente cada vez más estudiado por los científicos la fotorreactivación.

El objetivo principal de la investigación fue realizar experimentalmente en un reactor de radiación UV la desinfección del agua del efluente secundario tratada de la PTAR Totorá de Ayacucho con la finalidad de estudiar la reducción de microorganismos patógenos, mediante dos procesos, uno realizando la desinfección del agua del efluente secundario y dos realizando antes un proceso de filtración mediante un filtro sedimentador y otro de carbón activado.

Para el cumplimiento de los objetivos se obtuvieron e hicieron los análisis físico-químicos más importantes y bacteriológico del agua del efluente secundario de la PTAR Totorá y luego con los resultados obtenidos de la desinfección UV se

comparó los resultados con los que obtuvo la Planta Totorá y ver si se mejoró la calidad de agua en cuanto a la reducción de microorganismos patógenos de acuerdo a los niveles exigidos por las leyes peruanas y la Organización Mundial de la Salud.

Finalmente se concluye que el proceso de desinfección mediante radiación UV aplicado al agua del efluente secundario de la PTAR Totorá de Ayacucho, contribuye en el mejoramiento de la calidad del agua en cuanto a la eliminación de microorganismos patógenos de acuerdo a los niveles exigidos por las leyes peruanas y la Organización Mundial de la Salud.

## II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. ANTECEDENTES

De acuerdo a la revisión de los antecedentes, estos reportan estudios, investigaciones o proyectos tanto a nivel nacional e internacional que fortalecen el trabajo de investigación, algunos de ellos se mencionan a continuación:

**EPA, Folleto Informativo de Tecnología de Aguas Residuales, 1999**, describe que la desinfección con luz ultravioleta del agua residual es considerada como el principal mecanismo para la desactivación o destrucción de microorganismos patógenos con el fin de prevenir la dispersión de enfermedades transmitidas a través del agua, tanto para los usuarios del agua río abajo como al medio ambiente. Explica que el sistema de desinfección con luz ultravioleta transfiere energía electromagnética desde una lámpara de vapor de mercurio al material genético del organismo ADN o ARN, penetrando la radiación UV a través de las paredes de la célula del microorganismo, modificando el material genético y destruyendo la capacidad de reproducción del mismo.

**Pietrobon Elio, 2004**, describe que una desinfección eficiente del agua mediante la

irradiación ultravioleta (UV) involucra la observación de diversos principios que pueden ser nuevos para los profesionales del tratamiento de agua. El método presenta tanto desafíos como ventajas, ya que no deja residuos químicos en el agua como producto, pero sí requiere de un tratamiento previo para reducir los sólidos suspendidos totales que podrían perjudicar la transmisión de la luz ultravioleta, debido a un efecto de sombra que podría hacer que algunos contaminantes escapen de la desactivación.

**Sandoval, 2005**, presentó al XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales la investigación titulada cultivo de hortalizas con agua residual tratada y desinfectada con UV. El autor describe que la demanda de agua para consumo humano de pueblos y ciudades, han hecho que las aguas residuales municipales se conviertan, de un desecho a un recurso valioso para su uso en la agricultura y servicios públicos

**Romero Antonio, 2008**. Informó que la EDAR de Arco de la Frontera de España, entró en funcionamiento en el año 1994 y que está administrada por Aqualia desde el 2003. El tratamiento terciario está compuesto por un sistema de filtración por telas, tecnología pionera en España y un sistema de desinfección por luz ultravioleta. La capacidad de tratamiento terciario es de 300 m<sup>3</sup> de agua residual depurada por hora. El agua regenerada por el moderno tratamiento terciario es utilizada en los campos de golf.

**Zagaceta Maldonado Xavier, 2011**, gerente general de SEDAPAR Arequipa informó que la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Arequipa cuenta con un proyecto de “Ampliación y mejoramiento de sistemas de emisores y tratamiento

de aguas residuales de Arequipa metropolitana”, del Programa Juntos por una Arequipa Saludable y río Chili Limpio donde se indica la construcción de dos PTARs en la Zona Los Hurtados y Pampa la Escalerita con tecnologías limpias y modernas de sistemas de tratamiento semi intensivos con reactores anaeróbicos de flujo ascendente, filtros percoladores, sedimentadores secundarios y desinfección de efluentes con radiaciones UV, [PTAR Arequipa, 2011].

**Antolín Gutiérrez M. Elvira, [2014].** Trabajo de tesis de maestría en ingeniería agronómica de la Universidad de Valladolid, la investigación trata de la desinfección de agua de riego contaminada por *Ralstonia solanacearum* por radiación UV en la Balsa de Soto de Cerrato (Palencia). La problemática que plantea son las enfermedades de cuarentena de la papa por la *Ralstonia*, bacteria de crecimiento rápido que sobrevive fácilmente en aguas contaminadas, en el estudio las aguas de riego fueron desinfectadas utilizando radiación UV, eliminando la posible enfermedad de la papa por la bacteria, dando resultados positivos, en los diferentes ensayos realizados.

**Pantoja J., Proal M., García I., Chairez G., Osorio L., [Marzo 2015].** Trabajo realizado por profesores de la Universidad de Salamanca España, el objetivo de la investigación fue determinar las eficiencias comparativas de inactivación de bacterias de *Escherichia coli* y coliformes totales presentes en efluentes municipales tratados biológicamente mediante fotólisis de radiación (UV-C), así como por fotocatalisis heterogénea (UV-C/TiO/SiO ), y la determinación de la cinética de inactivación de las bacterias mediante la aplicación de un diseño factorial 2x2 con covariable y mediciones repetidas, en ambos casos obtuvieron buenos resultados,



ambas cumplieron con la normatividad española.

## **2.2. ASPECTOS NORMATIVOS LEGALES**

Las normas legales que amparan el estudio son:

- a. Marco legal del agua, uso, contaminación y tratamiento
- b. Normas legales referente a la reutilización del agua residual tratada.

### **2.2.1 MARCO LEGAL DEL AGUA, USO, CONTAMINACIÓN Y TRATAMIENTO**

**Ley de Recursos Hídricos N° 29338, junio 2009**

**Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, N° 29338**

**Ministerio de Agricultura:** Crea a DGAS-INRENA, D.L. N° 25902, 1992. Propone, supervisa y controla las políticas, planes, programas, proyectos y normas sobre el uso y aprovechamiento sostenible de los recursos agua y suelo.

**Ministerio de Salud:** Crea a DIGESA. Vela por la preservación del recurso agua. Controla emisiones de residuos contaminantes que causen daños a los seres humanos o al medio ambiente. Establece las condiciones para manejar estos desechos y si es necesario, puede solicitar a la Autoridad de Aguas que suspenda el suministro de agua al infractor, en tanto se toman las medidas correctivas.

**Ley General del Ambiente N° 28611:** Norma fundamental para la protección del ambiente. El Estado es el responsable de prevenir y controlar la contaminación ambiental y cualquier proceso de deterioro o depredación de los recursos naturales.

La Ley prevalece sobre cualquier otra norma que se le oponga. Se aplica el principio: quien contamina, paga. Prohíbe, descargar sustancias contaminantes sin tratamiento previo, la emisión de desechos que impidan o hagan peligrosa la utilización del agua, entre otros.

**Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM:** Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales

**Tabla 2.1: Límites máximos permisibles para PTAR, D.S. 003-2010-MINAM**

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>LMP de efluentes para vertidos de aguas</b>
Aceite y grasas	mg/l	20
Coliformes termotolerantes	NMP/l	10000
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l	100
Demanda química de oxígeno	mg/l	20
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos totales en suspensión	mg/l	150
Temperatura	°C	< 35

## **2.2.2 NORMAS LEGALES SOBRE LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL**

En cuanto a las normas sobre la reutilización de agua residual tratadas, primero presentaremos las normas Peruanas y luego los reglamentos de la EPA, el Título 22 de la ley de California de 1978.

**Ley de Recursos Hídricos N° 29338, junio 2009**

**Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, N° 29338**

**Normas de calidad del agua para riego agrícola:** La norma que regula el uso de las aguas tratadas para la agricultura en el Perú está aprobado en el D.S. 002-2008-MINAM, donde se reportan los estándares nacionales de calidad ambiental para el agua en cinco categorías.

Las tablas 2.2 y 2.3, presentan un resumen de la categoría 3 sobre los principales parámetros de agua para riego para vegetales y bebida de animales.

**Tabla 2.2: D.S. 002-2008-MINAM: Agua categoría 3, parámetro de riego de vegetales**

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Físicoquímico</b>		
Conductividad	μS/cm	< 2000
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l	15
Demanda química de oxígeno	mg/l	40
Oxígeno disuelto	mg/l	> = 4
pH	Unidad de pH	6.5 – 8.5
Sodio	mg/l	200
<b>Inorgánicos</b>		
Boro	mg/l	05 – 6
Cadmio	mg/l	0.005
Cromo(6 <sup>+</sup> )	mg/l	0.1
Mercurio	mg/l	0.001
Plomo	mg/l	0.15
<b>Orgánicos</b>		
Aceites y grasas	mg/l	1
Fenoles	mg/l	0.001
Detergentes	mg/l	1
<b>Plaguicidas</b>		
Aldrin	mg/l	1
DDT	mg/l	0.001
Paration	mg/l	7.5

**Tabla 2.3: D.S. 002-2008-MINAM: Agua categoría 3, parámetros biológicos para riego de vegetales de tallo bajo y tallo alto**

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Vegetales tallo bajo Valor</b>	<b>Vegetales tallo alto Valor</b>
<b>Biológicos</b>			
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ml	1000	2000
Coliformes totales	NMP/100 ml	5000	5000
Enterococos	NMP/100 ml	20	100
Escherichia coli	NMP/100 ml	100	100
Huevos de helmintos	Huevos/litro	< 1	< 1
Salmonela sp.		Ausente	Ausente
Vibrión cholerae		Ausente	Ausente

**Recomendaciones de la EPA:** Tratamiento secundario, filtración y desinfección.

pH : 6 a 9  
 DBO : < 10 mg/l de DBO  
 Cloro residual : 1 mg/l de Cl<sub>2</sub> residual.

**Título 22 de la Ley de California para la reutilización de aguas:**

Turbidez : 2 UNT  
 Coliformes fecales : < 2.2 NMP/100 ml (muestra puntual < 2.3 NMP/100 ml)

### **2.3 PROCESOS DE DESINFECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS**

Está comprobado que más del 60% de las enfermedades de los adultos y el 80% de los niños son producidos por virus y bacterias, transportados por el agua, información del Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social Brasileño, [BNDES, 1998]. Un tratamiento inapropiado del agua crea serios problemas de

salud en las personas, contrayendo enfermedades como el cólera, la hepatitis infecciosa, fiebre tifoidea, tuberculosis, meningitis, triconomas, glaucomas, dolor gastrointestinal, diarrea y otros. Un proceso de desinfección para agua residual tratada y esterilizada significa la eliminación total de patógenos por debajo de un nivel de medición especificado, entonces la esterilización es definida como la reducción de contaminantes igual o superior a 8 unidades logarítmicas, ( $10^{-8}$ ), o el 99.999999%. Un proceso de desinfección significa la reducción de la concentración de patógenos a niveles no infecciosos, [Pietrobon, 2004]. La desinfección significa libre de infección.

### **2.3.1 TECNOLOGÍAS DE DESINFECCIÓN**

Los fundamentos de la tecnología de la desinfección del agua estudian; los principios de inactivación de los microorganismos, tiempo de contacto, concentración y tipo de agente químico o intensidad y naturaleza del agente físico, temperatura, número de microorganismos, tipos de microorganismos y naturaleza del líquido a desinfectar. Existen una serie de variables que se deben tener en cuenta para la selección de la tecnología más apropiada en el proceso de desinfección, como son, los económicos, políticos, socioculturales, climáticos, institucionales, medioambientales, terreno, eficiencia y otros. Las principales tecnologías se clasifican en cuatro grupos:

- Tecnologías de desinfección por oxidantes químicos: cloro-derivados y ozono.
- Tecnología de desinfección por medio físico: radiación ultravioleta.
- Tecnología de desinfección por medios mecánicos: filtración por membranas, microfiltración y ultrafiltración.
- Tecnologías de oxidación avanzada:

## Procesos no fotoquímicos

Ozonización en medio alcalino, ( $O_3/OH^-$ )  
Procesos Fenton, ( $Fe^{2+}$ )  
Oxidación húmeda  
Oxidación electroquímica

## Procesos fotoquímicos

Peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta, ( $H_2O_2/UV$ )  
Foto-Fenton, ( $Fe^{+2}/H_2O_2/UV$ )  
Fotocatálisis heterogénea, ( $H_2O_2/TiO_2/UV$ )

### **2.3.2 MICROORGANISMOS PATÓGENOS EN EL AGUA RESIDUAL TRATADA**

Los agentes patógenos implicados en la transmisión hídrica de enfermedades son las bacterias, virus, protozoos, helmintos y cianobacterias. Estos microorganismos pueden causar enfermedades con diferentes niveles de gravedad, desde una gastroenteritis simple hasta cuadros graves de diarrea, disentería, hepatitis o fiebre tifoidea. La transmisión hídrica es solo una de las vías, pues estos agentes patógenos también pueden ser transmitidos a través de alimentos, de persona a persona debido a malos hábitos higiénicos, de animales al hombre, entre otras rutas, [Prescott, 1966].

### **2.4 DESINFECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS MEDIANTE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA**

La desinfección de agua mediante radiación UV es un procedimiento físico, que no altera el sabor, el olor y la composición química del agua. Desinfectar agua mediante radiación ultravioleta es la mejor manera de protegerse y la más moderna respuesta del futuro para tener agua saludable alrededor del mundo, [Pietrobon, 2004]. La seguridad de la desinfección UV está probada científicamente y

constituye una alternativa ecológica, segura, económica y eficaz frente a otros métodos de desinfección del agua como la cloración. Cuando la energía UV es absorbida por las células de las bacterias y virus, el material genético ADN y ARN son modificados de manera que no pueden reproducirse, entonces los microorganismos pueden ser considerados muertos y los riesgos de enfermedades para el hombre son eliminados.

#### 2.4.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO, ENERGÍA Y RADIACIÓN UV

Las radiaciones pueden ser caracterizadas como parte del espectro electromagnético que contiene un amplio intervalo de longitud de ondas ( $\lambda$ ), desde ondas de radio ( $\lambda \geq 1 \text{ m}$ ) hasta los rayos X ( $\lambda \leq 10^{-9} \text{ m}$ ), como muestra la figura 2.1.

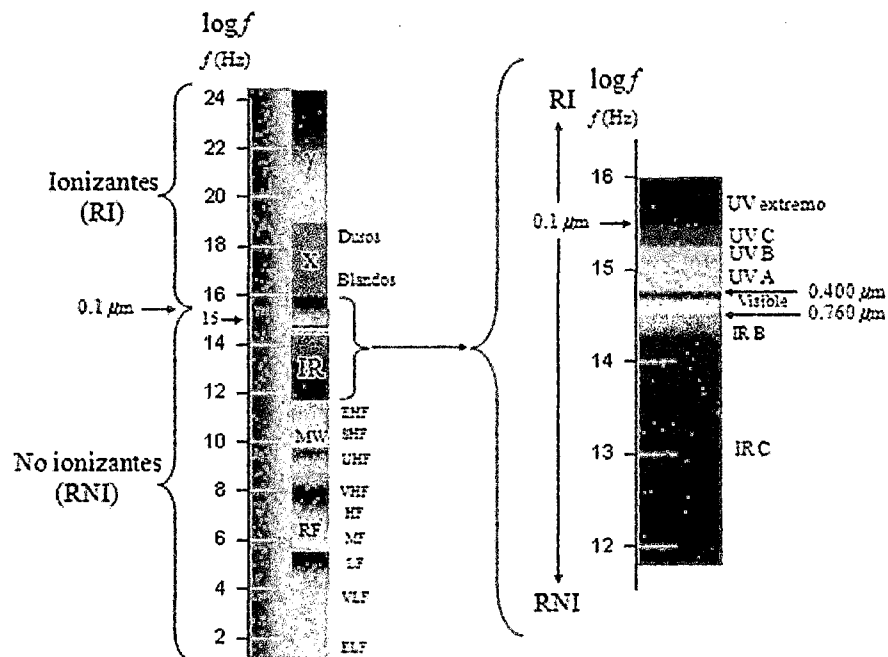


Figura 2.1: Localización de intervalos de longitud de onda UV, dentro de las radiaciones del espectro electromagnético, Fuente: [Ryer, 1997]

Las radiaciones electromagnéticas con longitudes de ondas cortas, como la luz ultravioleta, adquieren comportamientos corpuscular, fotón, gobernado por la física

cuántica, [Chang, 1977]. La cantidad de energía que los fotones concentran es inversamente proporcional a la longitud de onda de luz de acuerdo con la ecuación 2.1,

$$E_{\lambda} = h \frac{C}{\lambda} A \quad [2.1]$$

donde,

$E_{\lambda}$  = energía asociada a una determinada longitud de onda, [J/einstein]

$h$  = constante de Planck, [6.62606893x10<sup>-34</sup> J-s]

$C$  = velocidad de radiación electromagnética en el vacío, [3x10<sup>17</sup> nm/s]

$\lambda$  = longitud de onda de radiación electromagnética, [nm]

$A$  = número de Avogadro, [6.023x10<sup>23</sup> fotones/einstein]

La unidad "einstein" corresponde a la cantidad de energía concentrada para cada mol de fotones contenido en una determinada reacción fotoquímica. El efecto de un fotón sobre una determinada molécula depende, obviamente de la cantidad de energía que ella concentra, [PROSAB, 2003].

De acuerdo con la ecuación 2.1, donde,  $h$ ,  $\lambda$ , y  $A$  son constantes, la energía concentrada en un fotón es inversamente proporcional a la longitud de onda de la radiación emitida. Por tanto, la radiación infrarroja, con una longitud de onda superior a 1200 nm (nanómetros), tiene poca energía asociada, prácticamente incapaz de causar alguna modificación química en la molécula. Su efecto principal es el aumento de temperatura a través de la conversión de la energía asociada a la radiación en calor. Por otro lado, si la absorción de un fotón por una molécula promueve la fotólisis, la energía de los fotones es suficiente para romper un enlace específico o varios enlaces entre los átomos que componen la molécula fragmentada. El término fotólisis se refiere a la interacción de la radiación luminosa



con las moléculas, provocando la ruptura en los enlaces químicos y fragmentando la molécula. Las modificaciones fotoquímicas se producen comúnmente asociadas con la longitud de onda de la radiación entre 1200 y 200 nm. Las proteínas y los ácidos nucleicos absorben intensamente la radiación en el intervalo de 100 a 280 nm, dando como resultado modificaciones fotoquímicas que pueden alterar el metabolismo de las células y eventualmente causar la muerte. La región más efectiva del espectro en consecuencia se encuentra cerca a la longitud de onda de 260 nm, donde la energía es absorbida fuertemente por los ácidos nucleicos. De acuerdo con la ecuación 2.1, la energía asociada con esa radiación de longitud de onda es 460.24 kJ/einstein, que viene ser un valor superior al límite para diversos sistemas biológicos, tal como se muestra en la tabla 2.4.

**Tabla 2.4: Energías de enlace en sistemas microbiológicos**

Enlace	Energía de disociación de enlace [kJ/Einstein]
O-H	460.24 a 464.43
C-H	401.67 a 414.22
N-H	389.11
C=O	723.83 a 757.31
C-N	288.70 a 313.80
C=C	610.87 a 631.79
C-C	347.27 a 355.64

Fuente: [WEF, 1996].

## 2.4.2 RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

La radiación UV se encuentra dentro del rango de 100 a 400 nanómetros [1 nanómetro (nm) =  $10^{-9}$  metros]. Como los niveles de energía aumentan al disminuir

la longitud de onda, los rayos X tienen más energía que los rayos ultravioleta y la radiación UV tiene más energía que la luz visible. El espectro UV figura 2.2, se divide en cuatro regiones: UV-Vacío entre 100 a 200 nm; UV-C entre 200 a 280 nm; UV-B entre 280 a 315 nm y UV-A entre 315 a 400 nm. La radiación UV-C de onda corta es muy potente y contiene tanta energía que puede neutralizar bacterias y otros microorganismos patógenos, esta radiación es la que se aplica para el tratamiento de aguas residuales, potables, de acuicultura y para piscinas. La radiación UV-A o luz ultravioleta de larga longitud de onda llega a la tierra desde la radiación del sol, esta radiación tiene muy bajo valor germicida. La radiación UV-B o luz ultravioleta de mediana longitud de onda se presenta en las lámparas usadas para bronceado, estas ondas medianas también llegan con la radiación solar y tienen un pequeño efecto germicida.

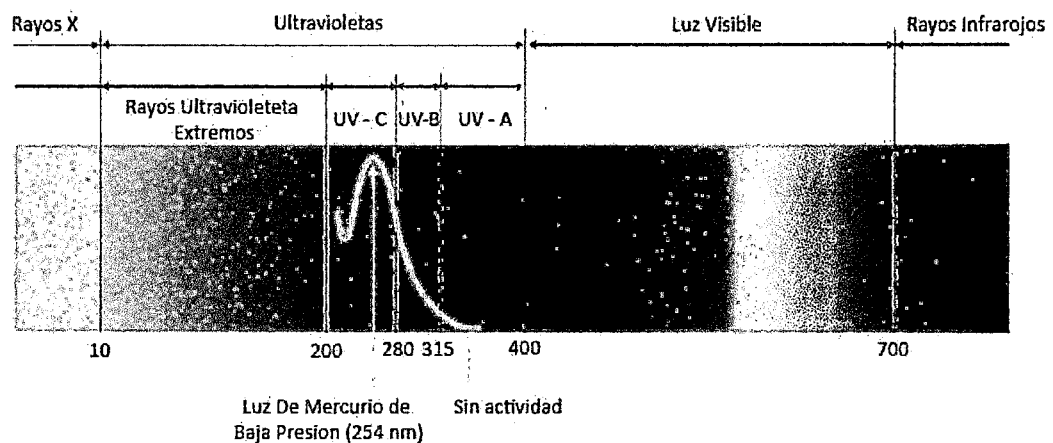


Figura 2.2: Espectro electromagnético y radiación ultravioleta, Fuente: [Carlino, 2011]

La radiación UV-C es la radiación ultravioleta de pequeña longitud de onda cuya acción germicida es efectiva. La acción germicida óptima de la radiación UV-C se presenta en el intervalo de longitud de onda de 260 a 265 nm. La radiación UV de

onda corta que viene del sol reacciona con el oxígeno para formar la capa de ozono de la atmósfera de la Tierra, esta radiación natural llega muy rara vez a la superficie de la tierra, es por eso que debemos producir radiación UV-C para desinfectar las aguas residuales tratadas.

La radiación UV es producida como resultado de un flujo eléctrico a través de vapor de mercurio entre los electrodos de una lámpara.

Las lámparas de baja presión de mercurio producen la mayoría de la radiación con longitud de 253.7 nm, esta longitud es muy próxima a la longitud de 260 a 265 nm, la más eficiente para eliminar microorganismos.

#### **2.4.2.1 VENTAJAS, [EPA, 1999]**

La desinfección con radiación UV es un proceso físico, no afecta al medio ambiente, no usa reactivos químicos que se tengan que almacenar, transportar o manejar.

- La desinfección con radiación UV es eficaz para la eliminación de la mayoría de los virus, esporas y quistes que están en el agua.
- El proceso de desinfección con UV no deja ningún efecto residual que afecte al ser humano o los peces.
- El proceso de desinfección mediante UV es de uso fácil para los operadores.
- La desinfección con radiación ultravioleta tiene un tiempo de contacto más corto en comparación con otros desinfectantes, aproximadamente de 10 a 20 segundos cuando se usa lámparas de baja presión.
- Los costos de instalación y operación son bajos si se compara con tecnologías similares como el cloro y el ozono.
- La instalación es fácil, se necesitan una conexión de energía y dos conexiones de agua.

- Al proceso de desinfección con UV no se añaden químicos, por lo tanto no se forman subproductos como sucede con el proceso de desinfección con cloro que con sustancias orgánicas forman los trihalometanos.
- El proceso de desinfección no produce ningún cambio en el color, olor, pH, conductividad o composición en la química del agua.
- El mantenimiento, limpieza periódica y reemplazo de lámparas anualmente es simple y fácil.

#### **2.4.2.2 DESVENTAJAS, [EPA, 1999]**

- Una baja dosificación de energía UV, puede no eliminar efectivamente algunos microorganismos patógenos.
- Si el ADN del microorganismo no ha sido totalmente alterado, este puede repararse o invertir los efectos destructivos de la radiación UV mediante la luz visible o en oscuro mediante luz UV-A.
- Se necesita de un programa de mantenimiento preventivo para controlar la acumulación de sólidos en la parte externa de los tubos de luz UV.
- La turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST) en el agua residual hacen que la desinfección con radiación UV sea ineficiente. El uso de la desinfección con lámparas UV de baja presión no es tan efectivo en el caso de efluentes secundarios con niveles de SST mayores a 30 mg/l, para ello de usarse lámparas UV de mediana presión.

#### **2.4.3 MECANISMOS DE ACCIÓN DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA DURANTE EL TRATAMIENTO DE DESINFECCIÓN**

La mayoría de los desinfectantes utilizados en aguas residuales tratadas, inactiva a los microorganismos mediante reacciones químicas; la inactivación de los microorganismos por radiación UV de alta energía, se produce mediante reacciones fotoquímicas sobre los componentes básicos de las células, perjudicando su funcionamiento normal e interrumpiendo el mecanismo de duplicación o provocando la muerte de la célula, [USEPA, 1999]. Según [Bolton, 2000], el

mecanismo de desinfección por radiación UV depende de la absorción de la radiación por las proteínas y por los ácidos nucleicos del ARN y ADN del microorganismo. La absorción de dosis altas de UV por las proteínas presentes en las membranas celulares lleva a la ruptura de esas membranas y consecuentemente a la muerte de la célula; en cambio la absorción de dosis más bajas de UV por el ADN interrumpe la capacidad del microorganismo a reproducirse, impidiéndole de esa manera infectar el medio.

### 2.4.3.1 MATERIAL GENÉTICO MICROBIANO

El ácido desoxirribonucleico, conocido como ADN, es un componente principal de los cromosomas y es la sustancia que forma los genes, está formado por dos filamentos compuestos por moléculas de desoxirribosa y fosfatos enroscados en doble hélice y unidos mediante bases nitrogenadas de adenina, citosina, guanina y timina, enlazadas por puentes hidrógeno como si se tratara de una escalera caracol, figura 2.3.

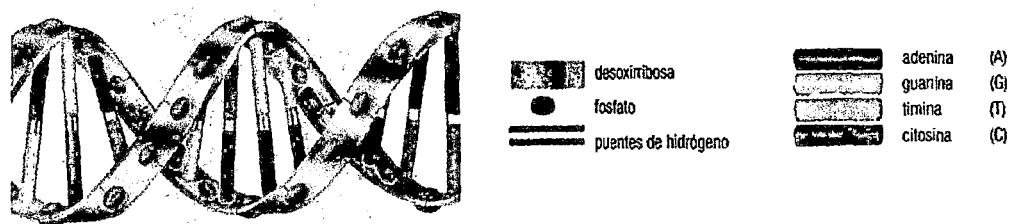


Figura 2.3: Representación de la cadena de ADN. Fuente: [Bolton 2000]

### 2.4.3.2 EFECTO DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA AL ADN

La radiación UV penetra la pared celular de los microorganismos y es absorbida por los materiales celulares, produciendo mutaciones en el ADN que resultan letales

en los organismos unicelulares y con más tiempo en otros tipos de organismos provoca su debilitamiento o detiene su reproducción. Las bacterias, virus, algas y esporas mueren al contacto con la radiación. El ADN de las células de los microorganismos absorbe la máxima cantidad de radiación UV cuando la longitud de onda de la radiación UV es de 254 nm. Esto hace que las células sean más susceptibles a sufrir alteraciones, tal como se puede observar en la figura 2.4.

Algunas moléculas presentes en el ADN, como las purinas y pirimidinas absorben fuertemente la radiación ultravioleta en la longitud de onda máxima de 254 nm y soportan cambios químicos formando dímeros e hidratos. La dimerización de la timina ha sido considerada como la causa principal del efecto mutagénico de la radiación UV.

Si una de las dos timinas adyacentes absorbe un fotón UV, se forma el dímero y se rompe la estructura del ADN, se bloquea la elongación de las cintas hijas durante la replicación del ADN y se inhibe la capacidad de reproducción del microorganismo, siendo éste el mecanismo fundamental de la desinfección UV, que se representa en la figura 2.4, [USEPA, 1999].

En el proceso de desinfección con radiación ultravioleta pueden ocurrir dos fenómenos de reactivación del microorganismo; uno, ciertos microorganismos poseen la capacidad de reparar el daño causado al ADN durante la exposición UV y retornar el estado original, inclusive volviéndose a reproducir, y dos, en algunas células dañadas puede ocurrir el proceso de la fotorreactivación si la dimerización no es muy irreversible, la radiación solar entre 330-500 nm, puede catalizar la ruptura de los dímeros y producir reversión, [Fujishima, 1993].

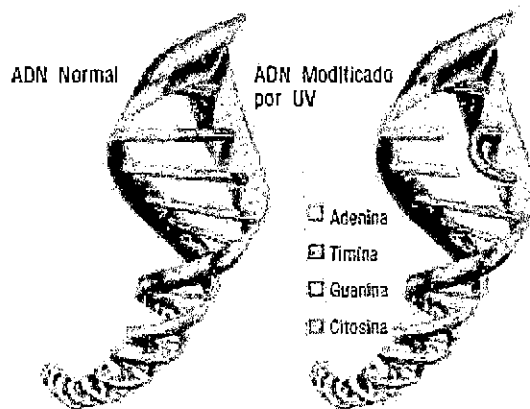


Figura 2.4: Secuencias del ADN normal y modificado. Fuente: [Díaz y Serrano, 2002]

#### 2.4.4 MODELACIÓN MATEMÁTICA

La modelación matemática de los fenómenos naturales cada día que pasa se hace más necesario. Esa curiosidad y la tentativa de describir los fenómenos físicos, químicos y biológicos dan como resultados el desarrollo de los modelos matemáticos que representa el proceso mediante una ecuación matemática. Dada la complejidad de los factores intervinientes algunos de mayor influencia como los mecanismos y las reacciones bioquímicas formadas en los procesos, fueron prácticamente imposible resolver las ecuaciones matemáticas formuladas con el modelo en tiempo atrás, pero hoy día con la ayuda de las computadoras, éstas han sido resueltas utilizando métodos numéricos. Respetando los límites y los errores del modelamiento matemático, es posible hoy día formular ecuaciones matemáticas para los fenómenos naturales y usar esas ecuaciones para pronosticar y predecir, en la optimización de procesos y diseño de equipos y plantas.

La desinfección del agua y agua residual utiliza la modelación matemática. Es de esperar que la complejidad sea imperiosa, pues están involucrados las reacciones

químicas, fotoquímicas y organismos vivos. La combinación de los factores trae como resultado algunos desvíos en la eficiencia de la desinfección porque esta varía mucho, dependiendo de la demanda de los desinfectantes y de los microorganismos estudiados, ya sea como resultado de la variabilidad de los géneros o de la población de una misma especie, relacionada al estudio de crecimiento y a la forma vegetativa, esporulada o enquistada, [PROSAB, 2001].

#### 2.4.4.1 LEY DE CHICK

En 1908, Chick observó al utilizar cultivos puros de *Bacillus ántrax*, que la reducción del número de unidades vivas seguía una reacción de primer orden bimolecular, conforme a la ecuación 2.2, [PROSAB, 2003].

$$\frac{dN}{dt} = -kN \quad [2.2]$$

donde,

- k = constante de velocidad de reacción o de decaimiento, [s<sup>-1</sup>]
- N = concentración de microorganismos, [NMP/ 100 ml]
- t = tiempo, [s].

Integrando la ecuación 2.2 bajo las condiciones límites: t=0, N= N<sub>0</sub> y t=t, N=N, resulta la ecuación 2.3.

$$\frac{N}{N_0} = e^{-kt} \quad [2.3]$$

La ecuación 2.3 es válida para las siguientes condiciones:

- Población homogénea de microorganismos, o sea cultivos puros
- Flujo pistón o bach de mezcla completa
- Distribución homogénea del desinfectante y microorganismos



- Concentración constante del desinfectante a través del tiempo
- La constante de velocidad de reacción  $k$ , debe ser determinada experimentalmente para cada proceso es decir para cada concentración de desinfectante.

#### 2.4.4.2 INTENSIDAD DE LA RADIACIÓN UV

Para determinar la intensidad, se utiliza las siguientes ecuaciones, 2.4, 2.5 y 2.6

$$A = \pi D L \quad [2.4]$$

donde,

$A$  = área lateral externa de la lámpara, [ $m^2$ ]

$D$  = diámetro externo de la lámpara de radiación UV, [ $m$ ]

$L$  = longitud de la lámpara, [ $m$ ]

#### INTENSIDAD INICIAL

$$I_0 = \frac{S}{A} \quad [2.5]$$

donde,

$I_0$  = intensidad de la radiación emitida por la fuente, [ $W/m^2$ ]

$S$  = potencia efectiva de la lámpara, [ $W$ ]

$A$  = área lateral de la lámpara, [ $m^2$ ]

#### INTENSIDAD REAL

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad [2.6]$$

donde,

$I$  = intensidad de la radiación que pasa a través de la capa de agua, [ $W/m^2$ ]

$I_0$  = intensidad de la radiación emitida por la fuente, [ $W/m^2$ ]

$\alpha$  = coeficiente de absorción o coeficiente de absorbancia, [ $m^{-1}$ ]

$x$  = espesor medio de la capa de agua expuesta a la radiación, [ $m$ ]

## 2.4.5 PRINCIPIOS BÁSICOS DE ÓPTICA Y RADIACIÓN UV

En los conocimientos de los mecanismos y de los procesos involucrados en la desinfección del agua y aguas residuales mediante radiación ultravioleta, es importante recordar las definiciones y conceptos básicos de la física aplicado a la radiación UV.

**Fuente de energía UV (S):** es la potencia (W) emitida en todas las direcciones por una fuente.

**Intensidad (I):** definida como la potencia total incidente en todas las direcciones de un elemento infinitesimal de área transversal  $dA$ , que contiene el punto considerado. En unidades del sistema internacional (SI), la unidad de intensidad es  $W/m^2$ , sin embargo es común el uso del  $mW/cm^2$  ( $1 mW/cm^2 = 10 W/m^2$ ). Para una posición a la distancia de un radio  $r$ , de una fuente puntual y en un medio no absorbente, la intensidad está dada por la ecuación 2.7, [Ryer, 1977].

$$I = \frac{S}{4\pi r^2} \quad [2.7]$$

donde,

$I$  = intensidad UV en un punto, [ $W/m^2$ ]

$S$  = potencia total de la fuente, [W]

$r$  = radio de la fuente puntual, [m]

**Dosis UV:** es el principal parámetro del modelo y control operacional de la desinfección UV, siendo definida como el producto de la intensidad de radiación  $I$ , por el tiempo de exposición  $t$ , (TRH). En unidades SI, la dosis es expresada  $J/m^2$ , sin embargo, es más común el uso del  $mW\cdot s/cm^2$  o  $mJ/cm^2$  ( $1 mJ/cm^2 = 1 mW\cdot s/cm^2$ ).

s/cm<sup>2</sup> = 10 J/m<sup>2</sup>). La dosis de radiación ultravioleta es obtenida por la ecuación 2.8, [PROSAB, 2001].

$$D = I t \quad [2.8]$$

donde,

D = Dosis, [J/m<sup>2</sup>]

I = intensidad UV, [W/m<sup>2</sup>]

t = tiempo de exposición de la radiación [s]

**Absorbancia y Ley de Beer-Lambert:** la radiación UV no es transmitida en un medio con intensidad constante, ni equivalente a la generada en la fuente. A partir de la fuente se produce un efecto de atenuación, debido a la absorción de la radiación originalmente emitida en su propio medio. Objetivamente estimar la referida atenuación para efecto del modelo, es común el empleo del coeficiente de absorbancia ( $\alpha$ ) para corregir la absorbancia del medio, de acuerdo con la ecuación 2.9.

$$\alpha = A \ln(10) = 2.303A \quad [2.9]$$

donde,

$\alpha$  = coeficiente de absorbancia, [m<sup>-1</sup>]

A = absorbancia a 254 nm por unidad de profundidad, [m<sup>-1</sup>]

La absorbancia de una radiación luminosa con una determinada longitud de onda a través de un líquido puede ser cuantificada por espectrofotometría, obteniendo la absorbancia de la energía por unidad de profundidad. La relación entre la absorbancia y la transmitancia es mostrada en la ecuación 2.10.

$$T (\%) = 100 \times 10^{-A} \quad [2.10]$$

donde,

T = transmitancia (%)

A = absorbancia por unidad de profundidad, ( $m^{-1}$ )

La variación de la intensidad media efectiva de una determinada radiación en un medio puede ser descrita por la Ley de Beer-Lambert, ecuación 2.11, [Chang, 1997].

$$I_{\text{promedio}} = \frac{I_0}{\alpha L} (1 - e^{-\alpha L}) \quad [2.11]$$

donde,

$I_0$  = intensidad UV aplicado al medio líquido, [ $J/m^2$ ]

L = paso de la luz, [m]

**Refracción y reflexión:** la radiación ultravioleta obedece a las leyes de la refracción y reflexión utilizadas en la física óptica de la luz visible. Sin embargo, los índices de refracción y reflexión varían en función a las longitudes de ondas, [Bolton, 2000, citado por PROSAB 2003]. Por tanto, son pocos los materiales que presentan grandes reflexiones de la radiación UV y no siempre son buenos reflectores de la luz visible, [Daniel, 1993, citado por PROSAB 2003]. El acero inoxidable refleja cerca del 20% de radiación UV a 254 nm, seguido del cobre, con el 10% y el espejo pulido aproximadamente el 7%, [Blatchley III 1997, citado por PROSAB 2003]. Bolton, 2000, propone que los efectos de reflexión y refracción serán despreciados en casos de desinfección de efluentes con menos de 90% de transmitancia.

## 2.5 DESINFECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE CLORO

El cloro puede ser usado como desinfectante en forma de gas comprimido bajo presión o en soluciones de agua, soluciones de hipoclorito de sodio, o de hipoclorito de calcio sólido, [Metcalf & Eddy, 1998].

## **2.5.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA DESINFECCIÓN POR CLORO**

### **Ventajas**

- Eliminación de color
- Eliminación de olor
- Biocida eficaz
- Método de desinfección fácil y barato
- Método más utilizado y el más conocido
- Relativamente seguro en la utilización de hipoclorito de sodio y calcio.

### **Desventajas**

- Permite la formación de subproductos
- Inactivaciones bajas para esporas y quistes de algunos virus, se deben utilizar las dosis recomendadas para la remoción de coliformes fecales
- Si es necesaria la decloración de las aguas los costos aumentan entre 20 y 30%
- El cloro gaseoso es corrosivo y peligroso
- El hipoclorito de sodio se degrada con el tiempo y con la exposición a la luz
- La cloración es menos eficaz a pHs altos.

## **2.5.2 POSIBILIDAD DE GENERAR SUBPRODUCTOS TÓXICOS**

Durante la cloración con cloro libre, el cloro molecular en medio acuoso forma el ácido hipocloroso, HOCl. Una parte de este ácido formado se disocia para formar el anión hipoclorito ( $\text{OCl}^-$ ) y el ion hidrógeno ( $\text{H}^+$ ). Por tanto el alcance de esta reacción depende del pH del medio. Si el anión bromuro está presente durante el proceso de desinfección se oxida a ácido hipobromoso (HBrO). Los ácidos hipoclorosos y hipobromosos reaccionan con el material orgánico de origen natural del agua, (MON), para formar subproductos entre los cuales están los trihalometanos (THM). Las cuatro especies principales de trihalometanos que se

forman son: cloroformo ( $\text{CHCl}_3$ ), diclorobromometano ( $\text{CHBrCl}_2$ ), clorodibromometano ( $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ) y tribromometano ( $\text{CHBr}_3$ ). La suma de las concentraciones de estos compuestos se denomina trihalometanos totales (THMT), [Borges y Guimarães, 2000]. Según Mohamed et. al., citado por Figueiredo et. al., 1999, la velocidad de formación de trihalometanos (THMs) en función del tiempo y de la dosis, se manifiesta en tres grandes intervalos secuenciales de dosis de cloro, donde la formación de THMs se mantiene a un nivel definido.

### **2.5.3 EFECTO SOBRE LA SALUD HUMANA Y AMBIENTE**

La preocupación por el uso de cloro se debe a la formación de subproductos organoclorados, potencialmente perjudiciales para la salud humana y pueden ser cancerígenos, mutagénicos o terapatogénicos. Según Daniel, 2001, la formación de trihalometanos (THM) surge de la reacción del cloro con sustancias húmicas y en menor medida la reacción de cloro con la materia orgánica presente en las aguas residuales. Esta preocupación es mayor cuando se trata de agua de abastecimiento. En el caso de las aguas residuales que se vierten, los subproductos pueden descomponerse en el ambiente, o ser eliminados por absorción. Incluso en el medio ambiente no se sabe hasta qué punto estos compuestos pueden ser dañinos, si son resistentes llegan a las PTARs, persistiendo en el agua hasta el final o acumulándose en los animales y plantas pudiendo llegar a los seres humanos que consumen esos productos.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de investigación fue realizado en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y en la Planta de Tratamiento de Agua Residual Totora de Ayacucho, durante el año 2015.

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL TOTORA DE AYACUCHO

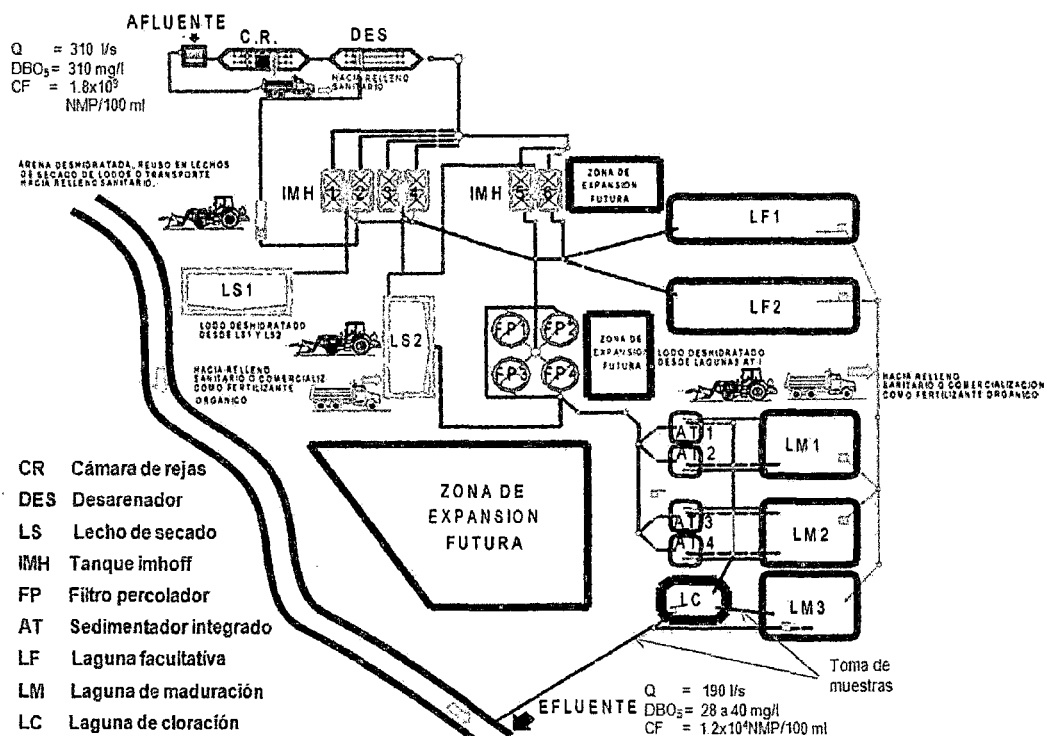


Figura 3.1: Esquema de los equipos, lagunas y flujos de la PTAR Totora de Ayacucho

El objetivo principal de la planta de tratamiento de agua residual Totora es mejorar la calidad de agua del efluente secundario desinfectado por cloro y que es vertido al río Alameda, agua que es reutilizada para varios fines río abajo. Los equipos y lagunas de la planta se muestran en la figura 3.1. Las aguas residuales procedentes de la ciudad de Ayacucho llegan a la planta con un caudal promedio de 310 l/s, con una DBO<sub>5</sub> de 310 mg/l y con una carga de coliformes fecales de  $1.8 \times 10^9$  NMP/100 ml.

El proceso comienza reteniendo primero los trapos, palos y diversos objetos grandes en la cámara de rejas C.R., operación necesaria para proteger las bombas, luego se separa las arenillas que es un material que desgasta los equipos, ocupa espacio y se sedimenta en los tanques o cámaras desarenadoras DES, donde los sólidos son retirados al lecho de grava y arenas. Luego el agua residual pasa por un medidor de flujo ultrasónico que mide el caudal las 24 horas del día.

En este punto la mayor parte de los sólidos pequeños todavía están en suspensión y la parte sedimentable de los mismos que son casi el 50% se separan y se concentran mediante el tratamiento primario en sedimentadores por gravedad mediante tanques imhoff IMH1, IMH2, IMH3, IMH4, IMH5 y IMH6, los sólidos concentrados llamado lodo deshidratado, se bombea o se separa hacia los lechos de secado LS1 y LS2, para su descomposición biológica y los efluentes de los tanques primario clarificado fluye hacia las unidades de tratamiento secundario pasando luego a las cajas de distribución.

El tratamiento secundario biológico se lleva a cabo en dos procesos diferentes. El primer proceso trabaja con el efluentes del tanque imhoff IMH6, que es más o



menos el 18% del caudal de la planta con las lagunas facultativas LF1 y LF2, donde se realiza el tratamiento secundario, el remanente pasa a la laguna de maduración LM3. El segundo proceso trabaja con los líquidos de los tanques imhoof IMH1, IMH2, IMH3, IMH4 y IMH5, que representa el 82% del caudal de la planta con los filtros percoladores FP1, FP2, FP3 y FP4, donde se realiza el tratamiento secundario con microorganismos fijos en lechos de piedra pómez, cuyos residuos sólidos son separados en los sedimentadores integrados AT1, AT2, AT3, y AT4, los líquidos remanentes son bombeados a las lagunas de maduración LM1 y LM2, para luego fluir a la laguna de maduración LM3, este efluente y el del proceso uno pasan a la laguna de cloración LC, para su desinfección por cloro, finalmente el efluente desinfectado es vertido al río Alameda.



**Figura 3.2: PTAR de Ayacucho vertido al río Alameda**

## **3.2 MATERIALES, APARATOS Y EQUIPOS**

### **Equipos principales**

- Agitador magnético, HANNA Instruments
- Aparato de pruebas de jarras

- Balanza analítica Sartorius, modelo Basic.
- Conductímetro XTECH Instruments.
- Cronómetro
- Equipo Kjeldahl
- Espectrofotómetro, HACH modelo DR/2010.
- Medidor de pH meter, HACH, modelo EC10.
- Turbidímetro, HACH modelo 2100p.

### **Materiales de vidrio**

- Balones volumétricos de 100, 500 y 1000 ml.
- Cisoles de porcelana.
- Embudos de vidrio.
- Erlenmeyer de 100 y 250 ml.
- Pipetas volumétricas de 10, 25, 50 y 100 ml.
- Probetas graduadas de 100, 500 y 1000 ml.
- Varillas de vidrio.
- Vaso de precipitado de 50, 100, 250 y 1000 ml.

### **Aparatos y materiales diversos**

- Balde plástico de 5 y 10 l.
- Bomba de vacío.
- Galones de 5 e 10 l.
- Bidón de 50 l.

### **Reactivos**

Ácido sulfúrico 0.02 N

- Buffer pH =10 (Cloruro de amonio – Hidróxido de amonio)
- Carbonato de sodio anhidro
- Carbonato de calcio
- Cloruro de Sodio q.p.

- Cromato de potasio al 5% p/v
- EDTA disódico 0.01 M
- Hidróxido de sodio 0.05 N
- Nitrato de plata 0.01 N
- Sulfato de aluminio,  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$
- Indicadores: Fenoftaleína, anaranjado de metilo, negro de eriocromo T y calcóncarboxílico.

### **3.3 METODOLOGÍA DEL PROCESO DE DESINFECCIÓN UV**

El diseño de un proceso de desinfección mediante radiaciones UV se relaciona estrechamente con el equipo hidráulico y variables del proceso. Las principales consideraciones generales son las características físico-químicas y bacteriológicas, tiempo de retención hidráulica y dosis de inactivación de microorganismos.

#### **3.3.1 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE PARA EL PROCESO DE DESINFECCIÓN**

Las principales variables seleccionadas para caracterizar el proceso de desinfección UV fueron:

**Flujo**, se debe conocer si el caudal a tratar está fluyendo por una tubería o por canal abierto y si el flujo del fluido se lleva a cabo a presión o por gravedad para poder determinar el modelo de flujo.

**Calidad del agua**, este parámetro es importante para estimar las interferencias posibles que impiden una penetración efectiva de la luz y saber si el efluente secundario no necesita un tratamiento terciario.

**Concentración de microorganismos**, para fijar la dosis de inactivación es

necesario censar la concentración y tipo de microorganismo del efluente de la PTAR.

**Sólidos totales en suspensión**, las partículas suspendidas en las aguas residuales constituyen un grave problema porque sirve como protección a los microorganismos cuando se aplica un desinfectante, estos sólidos son los puntos de adherencia de sustancias tóxicas, escudo protector de microorganismos, e incluso sirven para que se enquisten pequeños parásitos. La eliminación de las partículas en suspensión en las aguas residuales es por tanto uno de los objetivos primordiales en el proceso de desinfección con radiación ultravioleta.

**Transmitancia**, sin duda, es el parámetro dominante del proceso ya que el éxito de la desinfección radica en la eficiencia de penetración de la radiación UV. Evidentemente, cuando mayor es la transmitancia del agua, la penetración de la radiación UV es más alta, no solo eso, sino también la cantidad de agua que se puede desinfectar por unidad de tiempo es mayor. La mejor forma de medir la transmisión de luz ultravioleta en el agua es por medio de una pequeña muestra analizada por un aparato llamado fotómetro, que mide específicamente la transmisión de la luz UV a una longitud de onda de 254 nm en el agua, [Pietrobon, 2004].

**Conductividad eléctrica**, se define como la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución para conducir la corriente eléctrica.

El agua pura, prácticamente no conduce la corriente eléctrica, sin embargo el agua con sales disueltas conduce el fluido eléctrico.

**Turbiedad** es la expresión de la propiedad óptica de la muestra que causa que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra. La turbiedad en el agua puede ser causada por la presencia de partículas en suspensión y disueltas en gases, líquidos y sólidos tanto orgánicos como inorgánicos, con un ámbito de tamaños desde el coloidal hasta partículas macroscópicas, dependiendo del grado de turbidez.

### 3.3.2 VARIABLES REGISTRABLES Y UNIDADES DE ANÁLISIS

Las variables de control seleccionados para los experimentos de desinfección UV, se presentan en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1: Parámetros analizados y métodos utilizados en el análisis físico-químico y microbiológico del efluente secundario de la PTAR Totorá, desinfección UV**

<b>Variable y unidades</b>	<b>Descripción del método o equipo utilizado</b>
Absorbancia a la longitud de onda de 254 nm, [ $m^{-1}$ ]	Método espectrofotométrico. HACH, modelo DR/2010
Coliformes fecales, [NMP/100 ml]	Tubos múltiples
Conductividad, [ $\mu S/cm$ ]	Lectura automática. Conductímetro, XTECH
Demanda bioquímica de oxígeno	Método respirométrico
pH, [unidades de PH]	Medidor digital. HANNA
Sólidos totales en suspensión, [mg/l]	Filtrado con membrana 0.45 $\mu m$ , llevado a 102 °C, gravimétrico
Temperatura, [°C]	Lectura automática, Termómetro de mercurio de vidrio
Turbidez, [UTN]	Turbidímetro, HACH, modelo 2100p.

### **3.3.3 PROCEDIMIENTO PARA LA DESINFECCIÓN UV**

Para el estudio de la desinfección por radiaciones UV, durante los experimentos se mantuvo constante algunas variables, otras fueron variadas y otras no controladas. Fueron monitoreados y controlados, el tiempo de retención hidráulica (TRH) y el caudal (Q). Como parámetros variables y monitoreados se estudió el régimen flujo laminar, transición o turbulento, concentración inicial de microorganismos, concentración de los sólidos totales en suspensión STS, DBO<sub>5</sub> y la temperatura, los demás parámetros fueron fijos. Según **Legan, 1980**, se debe buscar siempre que con la geometría del sistema y la configuración del equipo instalado se pueda obtener la mejor eficiencia en la desinfección.

#### **3.3.3.1 PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS**

Las muestras para los análisis microbiológicos, fueron colectadas a la entrada y salida del sistema de desinfección UV en frascos de vidrio esterilizados y analizadas en un plazo de una hora. Para la determinación de los coliformes fecales se utilizó la técnica de tubos múltiples para identificar el número más probable de microorganismos (NMP), conforme al procedimiento analítico recomendado por Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

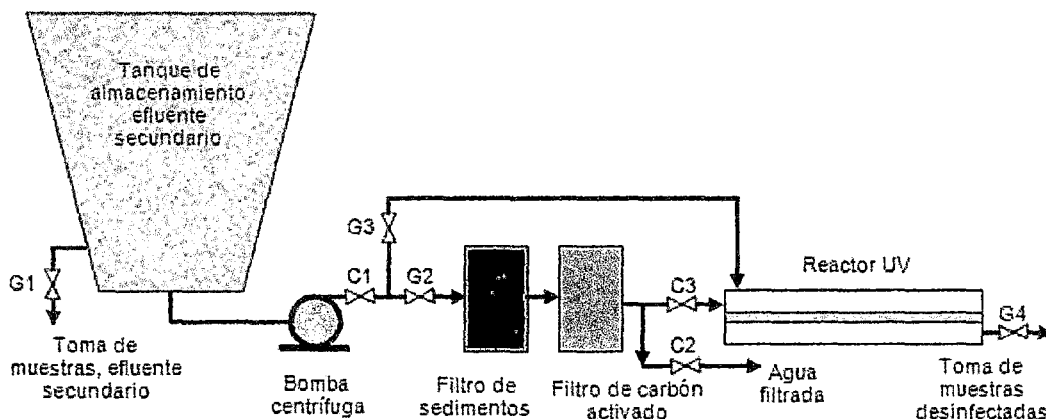
#### **3.3.3.2 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS**

Las muestras para los análisis físico-químico de los parámetros: absorbancia, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos totales en suspensión, fueron recolectadas a la entrada y salida del sistema de desinfección UV, preservadas y llevadas al laboratorio para las pruebas respectivas, Los otros parámetros fueron medidos in

situ: temperatura del ambiente, temperatura del agua del efluente, turbiedad y pH para cada experimento. También se siguió los métodos y procedimientos analíticos para la determinación de los parámetros físico- químico descritos teniendo en cuenta la recomendación por la Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

### 3.3.4 DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD PILOTO DE DESINFECCIÓN UV

La unidad de desinfección piloto UV consta de un tanque de almacenamiento de 50 L, una bomba de alimentación, un filtro de sedimentos, un filtro de carbón activado y un reactor de desinfección UV. El sistema de transporte tanque-bomba-reactor está unido por tuberías de PVC de ½ pulgada. El esquema piloto de desinfección UV se presenta en la figura 3.3.



**Figura 3.3: Esquema de la unidad piloto de desinfección UV**

#### 3.3.4.1 TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Un tanque con un volumen de 50 litros fue necesario para la obtención de un caudal estable en el sistema y modelo de flujo estacionario, teniendo en cuenta las

condiciones más críticas de operación, cuando el sistema piloto no funciona (tanque vacío), o el tanque de almacenamiento está lleno y operando al máximo caudal, por lo que se puede calcular el tiempo máximo de operación del sistema UV. Considerando un caudal de aproximadamente 7.45 L/min (0.1242 L/s), el tanque se descarga en 6.71 min (406.6 s), un tiempo corto pero suficiente para estabilizar y llegar al estado estacionario con flujo turbulento o laminar y realizar el proceso de desinfección.

El tanque de plástico tiene forma casi cilíndrica, con un diámetro en la base de 34 cm, un diámetro superior de 40 cm y una altura de 52 cm, un tubo de PVC de agua de media pulgada une el tanque con la bomba, a la salida de la bomba se bifurca el sistema en dos líneas, un tubo une la bomba con el reactor UV que descarga a la atmósfera el efluente desinfectado y otro tubo une la bomba con los filtros que puede descargar a la atmósfera o puede conectar el fluido al reactor.

El sistema de tubería, contiene como accesorios siete válvulas y una T de derivación de flujo, cuatro válvulas son de globo (G1, G2, G3 y G4) y tres son de compuerta (C1, C2 y C3), la válvula instalada después de la bomba C1, sirve solamente para dejar pasar el fluido o no, las válvula C2 y C3, sirven principalmente para derivar el agua filtrada que luego será cargada y almacenada en el tanque, o derivar el fluido si es necesario al reactor. La válvula G1, sirve para tomar la muestra del efluente secundario filtrado o no filtrado cargado en el tanque, la válvula G2, sirve para controlar el flujo que pasa por los filtros y reactor UV, la válvula G3 sirve para controlar el flujo que pasa por el reactor UV y la válvula G4 sirve para la toma de muestra de agua desinfectada después del reactor UV.



### 3.3.4.2 BOMBA DE ALIMENTACIÓN SISTEMA DE DESINFECCIÓN

El sistema tiene instalada una bomba centrífuga horizontal de ¼ hp de potencia.

### 3.3.4.3 REACTOR CON LÁMPARA DE RADIACIÓN UV PARA LA DESINFECCIÓN

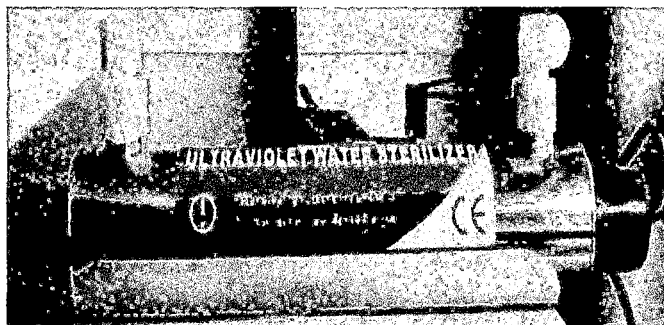
El reactor de desinfección es de flujo continuo con una lámpara inmersa, el flujo del efluente circula en dirección paralela a la lámpara de desinfección que está protegida mediante un tubo de cuarzo. La figura 3.4 muestra la foto del reactor y la tabla 3.2 presenta las características y especificaciones técnicas del reactor.

**Tabla 3.2: Característica y especificaciones técnicas del reactor ultravioleta (lámpara UV)**

<b>Especificaciones y características de la lámpara UV</b>	
Potencia nominal	17 W
Intensidad de la corriente eléctrica	0.3 A
Vida media de funcionamiento	9000 horas
Diámetro externo de la lámpara	26 mm
Longitud de la lámpara	30 cm
Presión de la lámpara	Baja

La carcasa del reactor es de acero inoxidable 316, de 6.5 cm de diámetro externo y longitud 30 cm, tiene en los extremos dos accesorios donde se adaptan la entrada y la salida del efluente, la parte interna es totalmente pulida, con un diámetro interno del reflector de 6.3 cm. El revestimiento interior de acero inoxidable pulido se utiliza para reflejar la radiación UV en el líquido sino esta sería absorbida por las paredes internas del reactor.

Para que sea posible el mantenimiento del reactor, la lámpara germicida está protegida con un tubo de cuarzo, el accesorio que une estas partes con la carcasa así como las conexiones entre el tubo protector de cuarzo del reactor y la carcasa, están hechos con un material flexible, que permite que la limpieza del tubo de cuarzo y la superficie interior del reactor sea más fácil.



**Figura 3.4: Foto del reactor UV**

El tubo de cuarzo tiene 30 cm de largo, 34 mm de diámetro externo y 32.5 mm de diámetro interno (1.5 mm de espesor). Una de las funciones del tubo de cuarzo es proteger la lámpara impidiendo su enfriamiento por el contacto con el fluido a ser desinfectado. Las lámparas comunes que no tiene protección causan grandes pérdidas de la eficiencia en la emisión de radiación UV, pues la temperatura óptima de funcionamiento de las lámparas está cerca a los 40 °C, [Legan, 1980].

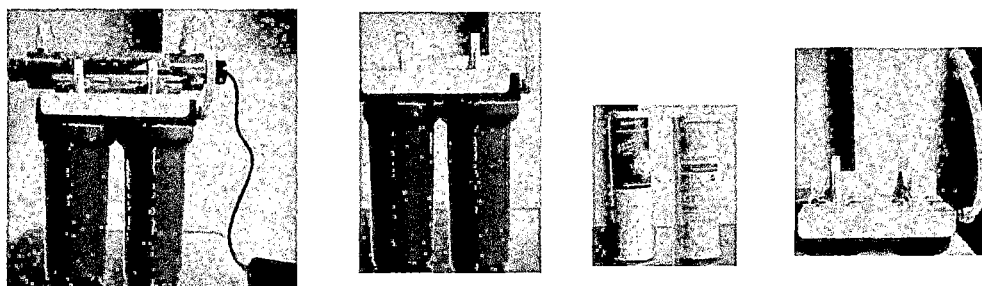
El cuarzo es un material que permite el paso de la radiación UV hasta el 90 % (transmitancia de 80 a 90 % a la longitud de onda de 254 nm), lo que no ocurre con el vidrio, [Legan, 1980]. Dentro de la camisa del tubo de cuarzo está colocada la fuente de radiación UV una lámpara germicida cuyas características son:

Las lámparas de vapor de mercurio de baja presión emiten la mayor parte de

radiación a la longitud de onda de 253,7 nm, más del 95% de la emisión total de la radiación ultravioleta es emitida a la longitud de onda de 253,7 nm, mientras que las lámparas de media presión de vapor de mercurio emiten energía en la longitud de onda en el intervalo de 180 a 1370 nm, aproximadamente el 70% de la potencia total emitida es ultravioleta. La potencia de las lámparas de media presión está entre 15 y 65 W, mucho mayor que las de baja presión, [Daniel, 2001 citado por Gomes 2008].

#### **3.3.4.4 EQUIPO DE FILTRACIÓN DE SEDIMENTACIÓN Y EQUIPO DE FILTRACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO**

Adicionalmente el reactor UV, tiene la opción de contar con dos equipos de filtración que pueden ser instalados en la parte inferior del reactor, el filtro de sedimentos en la parte izquierda y el filtro de carbón activado en la parte derecha.



**Figura 3.5: Fotos del reactor y accesorios, de derecha a izquierda: el reactor con los equipos de filtración, equipo de filtración con soporte del reactor, filtros de sedimentación y carbón activado y soporte del reactor-equipos de filtración**

El equipo de **filtración para sedimentos** está diseñado para retener los sólidos disueltos en el agua, su función es reducir los sedimentos finos, el filtro de sedimentos piloto tiene 2 pulg de diámetro, una longitud de 10 pulg y retiene

partículas mayores de 3 micras, es importante tener en cuenta que los filtros de sedimentos reducen sedimentos exclusivamente y por lo tanto no reducen la cantidad de químicos o metales pesados ni tampoco sirven para tratar el olor o sabor del agua.

El equipo de filtración de **carbón activado** posee la virtud de adherir o retener en su superficie uno o más componentes como átomos, moléculas e iones que contiene el líquido que está en contacto con él, el filtro de carbón activado piloto tiene 2 pulg de diámetro, una longitud de 10 pulg y retiene partículas mayores de 3 micras. El fenómeno de adherir o retener partículas en su superficie se denomina poder adsorbente. La adsorción es la responsable de purificar, desodorizar y decolorar el agua. El agua filtrada antes del proceso de desinfección UV, hace que la transmitancia del agua aumente y por consiguiente la desinfección UV sea mejor. La foto de la figura 3.5 muestra de izquierda a derecha, primero el reactor UV y sus accesorios, segundo los equipos de filtración con el soporte para el reactor, tercero los filtros de sedimentación y carbón activado y a la derecha el soporte para el reactor-equipo de filtración.

El objetivo de la filtración terciaria es remover partículas en suspensión y coloides del efluente secundario, minimizar el tratamiento de agua residual y realizar la facilidad del reúso de estas aguas. La filtración ha sido utilizada en el tratamiento de aguas y aguas residuales en la remoción de partículas y reducción de la concentración de microorganismos patógenos como Giardia, Cryptosporidium, Escherichia coli, coliformes totales y organismos fitoplanctónicos, [Marrara, 2005 citado por Pasquali, 2008].

### **3.3.5 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA**

Inicialmente fueron realizadas pruebas hidráulicas en la unidad piloto de desinfección UV, (tanque-bomba-reactor) antes de realizar los experimentos con el agua del efluente secundario de la PTAR Totorá. Durante la prueba del transporte del fluido se hizo circular agua potable de caño por todo el sistema de desinfección con el objetivo de verificar fugas del fluido. Para la medición de los caudales se utilizó probetas graduadas de 100, 500 y 1000 ml y un cronómetro.

Se siguió la técnica de **Severin, 1984**, sobre el método de estudio para caracterizar hidráulicamente un reactor de desinfección UV, parámetros importantes para evaluar la eficiencia de sistemas de desinfección, Severin realizó medidas de distribución de tiempos de residencia (DTR), con ensayos de tipo acción-respuesta. Una de las pruebas que realizó fue fijar un volumen de descarga en el tanque de almacenamiento (V), marcando el inicio y final del descenso de descarga del agua en el tanque y el tiempo de descarga (t) transcurrido, para luego calcular el caudal ( $Q=V/t$ ), para varios flujos, manipulando una válvula de control de flujo.

#### **3.3.5.1 PROCEDIMIENTO**

Se fijó un volumen de descarga de 6 litros en el tanque de almacenamiento para las pruebas de los tiempos promedios de descarga. En el tanque de almacenamiento internamente se marcó tres líneas que sirvieron para controlar el flujo de descarga, la primera línea fue marcada tomando como base la superficie libre del agua (parte superior del tanque), esta indica el inicio de la cantidad de fluido que se debe descargar para alcanzar el estado estable, la segunda línea marcada indica el inicio

de descarga del volumen de 6 litros, aquí se activa el cronómetro, tomando el tiempo como tiempo igual a cero, la tercera línea marcada indica el final de descarga de los 6 litros, aquí se detiene el cronómetro y se lee el tiempo transcurrido. La variación del flujo del fluido de descarga se hizo manipulando el vástago de la válvula de globo G3, que controla el flujo de salida de la bomba, el proceso tanque-bomba-reactor se puede seguir en la figura 3.3.

### **Pasos**

- Cerrar las válvulas G1, G2, C3 y G4 y llenar el depósito de almacenamiento con agua de caño hasta la primera marca.
- Poner operativa la bomba centrífuga, abrir la válvula G4 para un determinado caudal, esperar que el fluido descienda hasta la segunda marca para activar el cronómetro, controlar el tiempo cuando el fluido alcance la tercera marca y apagar la bomba.
- Repetir cinco veces los pasos anteriores para un mismo caudal.
- Repetir el procedimiento para otros caudales, cerrando la válvula G3 a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$ , 1 y  $1\frac{1}{2}$  de vuelta.

### **3.3.5.2 ECUACIONES**

Para obtener el caudal promedio, primero se obtiene el tiempo promedio con los cinco tiempos para cada ensayo, luego se divide el volumen de 6 litros entre el tiempo promedio. El tiempo de retención hidráulica fue el parámetro utilizado para definir el tiempo medio de permanencia del agua en el reactor irradiado con luz ultravioleta y flujo continuo. La ecuación de diseño para determinar el tiempo de

retención hidráulica TRH, sigue la ecuación 3.1.

$$TRH = \frac{V_{reactor}}{Q_{prom}} \quad [3.1]$$

donde,

TRH = tiempo de retención hidráulica, [s]

$V_{reactor}$  = volumen del reactor, [m<sup>3</sup>]

$Q_{prom}$  = caudal promedio que pasa por el reactor, [m<sup>3</sup>/s].

### 3.4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE DESINFECCIÓN UV

Los parámetros hidráulicos de funcionamiento y operación del equipo UV más importantes fueron monitoreados, los tiempos de residencia y caudales fueron controlados y variados mediante la manipulación del vástago de la válvula de globo, los demás parámetros fueron fijados por la geometría del sistema buscando siempre la mejor eficiencia de la desinfección de acuerdo con el estudio de **Legan, 1980**.

Se realizaron dos tipos de ensayos de desinfección UV:

#### **Ensayos tipo 1:**

Con agua del efluente secundario directamente desinfectada utilizando el reactor piloto UV. Proceso: tanque-bomba-reactor.

#### **Ensayos tipo 2:**

Con agua del efluente secundario previamente filtrada utilizando el equipo de filtración de sedimentación y equipo de filtración de carbón activado. Proceso:

tanque-bomba-filtros. Luego, el agua filtrada fue cargada al tanque de almacenamiento para ser bombeada y desinfectada por el reactor UV. Proceso: tanque-bomba-reactor.

Los ensayos de prueba tipo 2 se hicieron con la finalidad de observar en los resultados, como influye la materia en suspensión en la desinfección por radiación UV.

**El procedimiento operativo fue estandarizado de la misma manera para todas las pruebas. Las operaciones sistemáticas del sistema de desinfección UV fueron como sigue:**

- Cerrar las válvulas G1, G2, C3 y G4 y llenar el depósito de almacenamiento con agua del efluente secundario o efluente filtrado.
- Tomar muestras de agua del efluente almacenado en el tanque en frascos preparados y esterilizados para los respectivos análisis, manipulando la válvula G1.
- Activar el interruptor eléctrico de la lámpara UV y esperar 5 minutos para que alcance el estado estacionario de emisión máxima de radiación y temperatura estable de calentamiento, es decir las variables mencionadas no deben variar con el tiempo.
- Poner operativa la bomba de alimentación, abrir la válvula G4 para un determinado caudal, esperar que el fluido fluya con flujo estacionario, recibir el fluido desinfectado en un recipiente limpio y apagar la bomba cuando el agua del tanque haya descendido aproximadamente 10 litros.
- Finalmente tomar muestras de agua desinfectada en frascos preparados y



esterilizados para el análisis bacteriológico.

- Repetir los pasos anteriores para otros caudales y tiempos de retención hidráulica conocidos, manipulando el vástago de la válvula de globo.

Las muestras de agua tomadas para el análisis bacteriológico a la entrada y salida del sistema de desinfección, fueron enviadas al laboratorio donde se realizaron el conteo de los coliformes fecales por duplicado. Se tuvo cuidado en el tiempo transcurrido entre la recolección de las muestras y los análisis microbiológicos en no exceder una hora, de modo que la influencia a la fotorreactivación no prospere.

El análisis bacteriológico se realizó por la técnica de los tubos múltiples y membrana filtrante a la salida. Los resultados se expresaron en términos del número más probable de microorganismos por 100 ml muestra (NMP/100 ml) para los coliformes fecales. La determinación de la absorbancia a 254 nm (nanómetros) de las muestras de los ensayos para la determinación de la intensidad real de la fuente UV fue obtenida a través de un espectrofotómetro modelo 8451A, marca Hewlett-Packard. Periódicamente se hizo el mantenimiento del sistema de desinfección UV, principalmente realizando una limpieza al reactor UV.

Si la dosis de UV utilizada no es letal, una parte de los microorganismos inactivados se pueden reactivar bajo irradiación de la luz en el intervalo visible. Además, la radiación UV por ser mutágeno puede causar mutaciones genéticas en los microorganismos, en lugar de inactivarlas. Por lo tanto, la dosis correcta UV es una variable importante en las instalaciones de desinfección, por consiguiente el reactor para la desinfección de agua por radiación ultravioleta, debe ser eficiente para asegurar una dosis letal, [Gomes, 2008]. Según Braga, 2005, citado por Gomes,

2008, los coliformes fecales son elegidos como indicadores de presencia de organismos patógenos de origen fecal en el agua debido a que:

- Existen en grandes cantidades en las heces y no existen en ningún otro tipo de materia orgánica contaminante, por lo tanto, son indicadores específicos de la materia fecal.
- Algunas bacterias pertenecientes al grupo por ejemplo *Escherichia coli*, no se reproducen en el agua o el suelo, pero exclusivamente si dentro de los intestinos o en medios de cultivo especiales a temperatura adecuada, por lo tanto, sólo son encontradas en el agua cuando se introduce la materia fecal.
- Presentan resistencia al medio como la luz, oxígeno, cloro y otros agentes destructores de bacterias, comparable a los que presentan los principales patógenos intestinales que puede ser transmitida por el agua, de esta manera, se reduce la posibilidad de que existan patógenos fecales cuando no se encuentren coliformes.
- Su caracterización y la cuantificación se realiza mediante métodos relativamente simples. Las bacterias coliformes son los únicos capaces de fermentar lactosa, produciendo gas y residuos en presencia de bilis que es un componente normal del intestino. De ese modo, si el agua de la muestra se somete a varias diluciones y son sembradas sucesivamente en tubos, la formación de gas caracteriza la presencia de bacterias.

## **IV. RESULTADOS**

En la sección siguiente se presenta los resultados obtenidos de los principales parámetros de la caracterización del agua del efluente secundario de la PTAR Totorá, antes y después de la desinfección UV y la parte experimental del estudio del proceso de desinfección mediante radiación UV, sin y con filtración del agua del efluente secundario.

### **4.1. TIEMPO Y CAUDAL PROMEDIOS**

Primero se hizo pruebas hidráulicas con el equipo piloto de desinfección para comprobar su correcto funcionamiento con agua potable. Para determinar los tiempos medios que se van a utilizar en los cálculos para los tiempos de retención hidráulica, también se utilizó agua limpia potable de caño. Los ensayos se hicieron siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.3.5.1, para la determinación de los tiempos promedios. Para determinar el tiempo promedio cuando la válvula de globo G3 está completamente abierta, (válvula que se puede observar en el esquema de la unidad piloto de la figura 3.3), se corrió cinco ensayos controlando los tiempos. El mismo procedimiento hidráulico se hizo para otros flujos cerrando la válvula de globo. La tabla 4.1 presenta los resultados de los tiempos promedios obtenidos para cada prueba y la determinación de los caudales promedios. El caudal

promedio  $Q_p$ , se obtiene dividiendo el volumen utilizado de 6 litro para todos los ensayos dividido entre el tiempo promedio,  $t_p$ .

**Tabla 4.1: Resultados de tiempos promedios y caudales para un volumen de 6 litros de descarga**

Vástago de la válvula, G3	Tiempos, [s]					Tiempo promedio, $t_p$ , [s]	Caudal promedio, $Q_p$ , [l/s]
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$		
Totalmente abierta	8.01	7.69	7.90	7.77	7.73	7.82	0.7673
¼ vuelta cerrada	11.36	11.47	11.32	11.02	11.53	11.34	0.5291
1/2 vuelta cerrada	14.98	14.68	15.35	14.81	15.03	14.97	0.4008
3/4 vuelta cerrada	18.35	18.66	18.02	18.71	18.16	18.38	0.3265
1 vuelta cerrada	21.89	22.15	22.01	21.70	22.20	21.99	0.2728
1 ½ vuelta cerrada	25.94	25.57	25.75	25.14	25.50	25.58	0.2346

## 4.2 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA, TRH

En la tabla 4.2 se presenta los valores determinados para los tiempos de retención hidráulica y el modelo de flujo.

### Volumen del reactor

$$V_{reactor} = V_{Total} - V_{lámpara}$$

$$V_{reactor} = \frac{\pi}{4} D_{reactor}^2 L - \frac{\pi}{4} D_{lámpara}^2 L$$

$$V_{reactor} = \frac{\pi}{4} 6.3^2 \times 30 - \frac{\pi}{4} 2.6^2 \times 30$$

$$V_{reactor} = 775.89 \text{ cm}^3 = 0.776 \text{ l}$$

El tiempo de retención hidráulica se obtuvo aplicando la ecuación 3.1, dividiendo el volumen de 0.776 litros ocupado por el líquido en el reactor ( $V_{reactor}$ ) entre el caudal promedio  $Q_p$ .

El número de Reynolds  $N_{Re}$ , indica cómo se desarrolla el modelo flujo del fluido dentro del reactor UV, un flujo con modelo turbulento ( $N_{Re} > 4000$ ), revela que se ha alcanzado el estado estable y que las variables estudiadas no variarán con el tiempo para el proceso con flujo continuo.

**Tabla 4.2: Resultados de la prueba de los TRH y modelo de flujo**

Vástago de la válvula	Caudal promedio [l/s]	TRH, [s]	Número de Reynolds	Modelo de flujo
Totalmente abierta	0.7673	1.011	10063	Turbulento
¼ de vuelta cerrada	0.5291	1.467	6960	Turbulento
1/2 vuelta cerrada	0.4008	1.936	5249	Turbulento
3/4 vuelta cerrada	0.3265	2.377	4292	Turbulento
1 vuelta cerrada	0.2728	2.845	3596	Transición
1 ½ vuelta cerrada	0.2346	3.308	3074	Transición

### 4.3 PROCESO DE DESINFECCIÓN CON RADIACIÓN UV

Fueron realizados dos tipos de pruebas de desinfección UV (fecha = 30-09-15), la primera fue con agua del efluente secundario sin procesos de filtración y la segunda con procesos de filtración.

Para el primer tipo se utilizó el sistema tanque-bomba-reactor. Para el segundo tipo con procesos de filtración se hizo con dos procesos distintos, en el primero se utilizó el sistema tanque-bomba-filtros y en el segundo se usó parte del agua filtrada que fue transportada y almacenada en el tanque para luego realizar la operación de desinfección, utilizando el sistema tanque-bomba-reactor.

### 4.3.1 PROCESO DE DESINFECCIÓN UV: AGUA DEL EFLUENTE SECUNDARIO SIN FILTRACIÓN

#### 4.3.1.1 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO: PROCESO DE DESINFECCIÓN UV SIN FILTRACIÓN

Tabla 4.3: Resultados de los análisis físico-químico y bacteriológico del proceso de desinfección UV, sin filtración

Parámetro	Fluido del efluente secundario, sin filtración	Fluido después del proceso de desinfección UV
Absorbancia, [cm <sup>-1</sup> ]	0.42	0.41
Coliformes fecales, [NMP/ 100 ml]	70000000	54628
Conductividad, [μS/cm]	610.4	612.7
DBO <sub>5</sub> , [mg de O <sub>2</sub> / ml]	389.0	371.8
pH, [unidades de pH]	7.32	7.30
Sólidos totales en suspensión, [mg/ml]	286	290
Temperatura, [°C]	19.4	19.5
Turbiedad, [UNT]	26.2	25.9

#### 4.3.1.2 REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES

Los resultados bacteriológicos obtenidos en la desinfección UV con agua tratada del efluente secundario sin filtración, están resumidos en la tabla 4.4, que presenta los valores de entrada y salida de los coliformes fecales y los respectivos valores en términos de remoción logarítmica y porcentaje. La remoción de microorganismos en porcentaje se calculó, restando los microorganismos iniciales menos los microorganismos sobrevivientes, dividido por los microorganismos

iniciales y multiplicado por 100. Observando las secuencias de los valores de remoción se nota que hay un aumento lógico respecto al TRH, debido al aumento del tiempo de exposición a la radiación UV.

**Tabla 4.4: Resultado bacteriológico; coliformes fecales sobrevivientes después de la desinfección UV, agua efluente secundario sin filtración**

TRH, [s]	No, [NMP/ 100 ml] CF iniciales	N, [NMP/ 100 ml] CF sobrevivientes	Remoción	
			-Log(N/No)	%
1.011	70000000	800242	1.942	98.856
1.467	70000000	457088	2.185	99.347
1.936	70000000	267300	2.418	99.618
2.377	70000000	167109	2.622	99.761
2.845	70000000	96383	2.861	99.862
3.308	70000000	54628	3.107	99.922

#### **4.3.1.3 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA NECESARIA PARA LA INACTIVACIÓN DE COLIFORMES FECALES, AGUA EFLUENTE SECUNDARIO SIN FILTRACIÓN**

La tabla 4.5 presenta el resultado de los tiempos de retención hidráulica en función de los coliformes fecales sobrevivientes, (N), del agua del efluente secundario sin filtración.

Los datos de la columna 1 (TRH) y columna 4 (- logN/No) de la tabla 4.5 fueron ploteados dando como resultado el grafico 4.1.

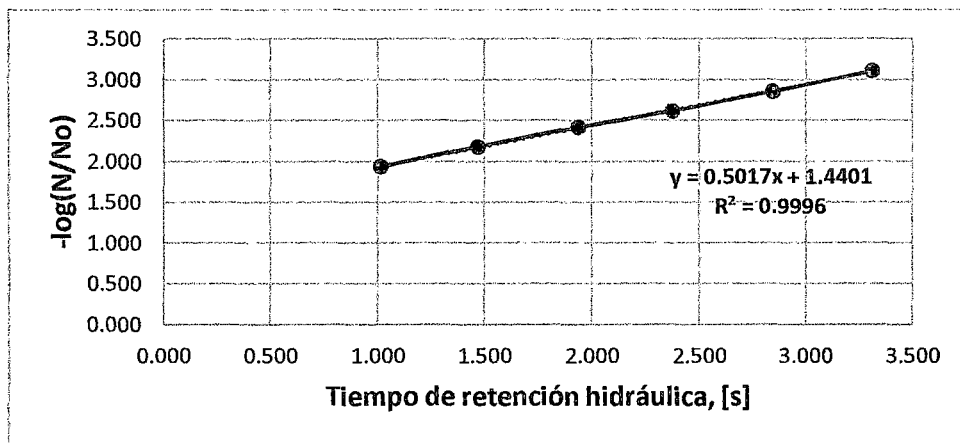
El estudio de esta sección sirve para calcular los tiempos de retención hidráulica de inactivación de coliformes fecales.

**Tabla 4.5: TRH y resultado bacteriológico de los coliformes fecales sobrevivientes, agua efluente secundario sin filtración**

TRH, [s]	No, [NMP/ 100 ml]	N, [NMP/ 100 ml]	-log(N/No)
1.011	70000000	8000242	1.942
1.467	70000000	457088	2.185
1.936	70000000	267300	2.418
2.377	70000000	167109	2.622
2.845	70000000	96383	2.861
3.308	70000000	54628	3.107

El gráfico 4.1 que plotea los valores de  $-\log(N/N_0)$  en función del tiempo de retención hidráulica da como resultado la línea recta de ecuación:

$$y = 0.5017x + 1.4401 \quad [4.1]$$



**Gráfico 4.1: Tiempo necesario para la inactivación de coliformes fecales**

#### 4.3.1.4 DOSIS NECESARIA PARA LA INACTIVACIÓN DE COLIFORMES FECALES, AGUA EFLUENTE SECUNDARIO SIN FILTRACIÓN

ESPESOR MEDIO, CAPA LÍQUIDA ENTRE EL REACTOR Y LA LÁMPARA (X)



Área de la pared interna del reactor en contacto con el líquido

$$A_{i_{reactor}} = \pi D_{i_{reactor}} L = \pi 6.3 \text{ cm } 30 \text{ cm} = 593.76 \text{ cm}^2$$

Área exterior de la lámpara del reactor en contacto con el líquido

$$A_{lámpara} = \pi D_{e_{lámpara}} L = \pi 2.6 \text{ cm } 30 \text{ cm} = 245.04 \text{ cm}^2$$

Área media irradiada

$$A_{Media} = \frac{A_{i_{reactor}} + A_{lámpara}}{2} = \frac{593.76 + 245.04}{2} = 419.40 \text{ cm}^2$$

Volumen del reactor (calculado en la sección 4.2)

$$V_{reactor} = 775.89 \text{ cm}^3 = 0.776 \text{ l}$$

Espesor de la capa líquida

$$V_{reactor} = A_{Media} x$$

$$x = \frac{V_{reactor}}{A_{Media}} = \frac{775.89 \text{ cm}^3}{419.40 \text{ cm}^2} = 1.85 \text{ cm}$$

**Potencia efectiva UVC**

Dato tabla 3.2

$$Pot_{efectiva} = 17 \times 0.65 = 11.05 \text{ W}$$

**Intensidad de la fuente**

Aplicando la ecuación 2.5,

$$I_0 = \frac{Pot_{efectiva}}{A_{lámpara}} = \frac{11.05}{245.04} = 0.0451 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

**Coefficiente de absorbancia**

Aplicando la ecuación 2.9,

$$\alpha = 2.303 \times A = 2.303 \times 0.42 = 0.967$$

**Intensidad a través de la capa de agua**

Aplicando la ecuación 2.6,

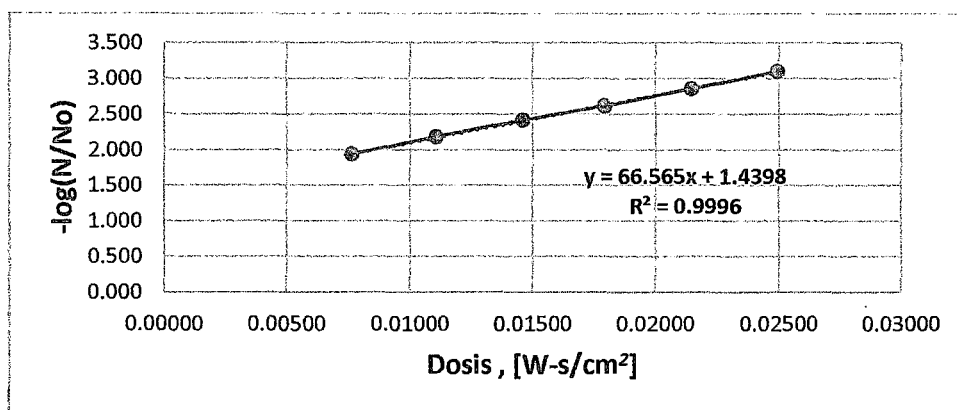
$$I = I_0 e^{-\alpha x} = 0.0451 x e^{-0.967 \times 1.85} = 0.00754 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

**Dosis:** Aplicando la ecuación 2.8,  $D = I \times TRH$ , para la construcción de la tabla 4.6

**Tabla 4.6: Resultado, dosis necesaria para la inactivación de coliformes fecales**

TRH, [s]	I, [W/ cm <sup>2</sup> ]	Dosis, [W-s/cm <sup>2</sup> ]	- log(N/No)
1.011	0.00754	0.00763	1.942
1.467	0.00754	0.01106	2.185
1.936	0.00754	0.01459	2.418
2.377	0.00754	0.01792	2.622
2.845	0.00754	0.02145	2.861
3.308	0.00754	0.02194	3.107

Al graficar el valor de  $-\log(N/No)$  en función de la dosis, se obtiene el grafico 4.2. Estudio que se hizo con la finalidad de obtener las dosis necesarias de inactivación de coliformes fecales.



**Gráfico 4.2: Dosis necesaria para la inactivación de coliformes fecales**

En el gráfico 4.2, se observa que el logaritmo negativo de la relación de coliformes fecales sobrevivientes entre las coliformes fecales inicial en función de la dosis nos da una línea recta cuya ecuación es:

$$y = 66.565x + 1.4398 \quad [4.2]$$

### 4.3.2 PROCESO DE DESINFECCIÓN UV: AGUA EFLUENTE SECUNDARIO PREVIAMENTE FILTRADA

Los filtros de sedimentación están diseñados para retener sólidos en suspensión, detienen muy poco a los químicos o metales y los filtros de carbón activado retienen en su superficie a átomos, moléculas e iones que contiene el líquido en contacto con él.

#### 4.3.2.1 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO, AGUA EFLUENTE SECUNDARIO Y AGUA FILTRADA

La tabla 4.7 presenta los resultados de los análisis del proceso del agua tratada del efluente secundario y agua luego del proceso de filtrado.

**Tabla 4.7 Resultados de los análisis físico-químico y bacteriológico del agua del efluente secundario y agua luego del proceso de filtrado**

Parámetro	Fluido del efluente secundario	Fluido filtrado
Absorbancia, [cm <sup>-1</sup> ]	0.42	0.31
Coliformes fecales, [NMP/ 100 ml]	70000000	2500400
Conductividad, [μS/cm]	610.4	285.6
DBO <sub>5</sub> , [mg de O <sub>2</sub> / ml]	389.0	78.4
pH, [unidades de pH]	7.32	7.51
Sólidos totales en suspensión, [mg/ml]	286	51
Temperatura, [°C]	19.4	20.3
Turbiedad, [UNT]	26.2	5.8
Transmitancia, [%]	36.75	52.37

#### 4.3.2.2 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO: PROCESO DE DESINFECCIÓN UV CON FILTRACIÓN

**Tabla 4.8 Resultados de los análisis físico-químico y bacteriológico del proceso de desinfección por UV, con filtración**

Parámetro	Fluido del efluente secundario filtrado	Fluido después del proceso de desinfección UV
Absorbancia, [cm <sup>-1</sup> ]	0.31	0.29
Coliformes fecales, [NMP/ 100 ml]	2500400	81
Conductividad, [μS/cm]	285.6	283.9
DBO <sub>5</sub> , [mg de O <sub>2</sub> / ml]	78.4	35.73
pH, [unidades de pH]	7.51	7.50
Sólidos totales en suspensión, [mg/ml]	51	50
Temperatura, [°C]	20.3	20.2
Turbiedad, [UNT]	5.8	5.1

El carbón activado es uno de los materiales más citado en trabajos relacionados a la adsorción, debido a su costo relativamente bajo, siendo una opción en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua, presenta un área superficial y porosidad elevada, tiene la capacidad para la adsorción de gases y compuestos dispersos en líquidos, [Oliveira et al., 2002].

#### 4.3.2.3 REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES, PROCESO DE DESINFECCIÓN UV, EFLUENTE SECUNDARIO CON FILTRACIÓN

Los resultados obtenidos de la desinfección UV con agua del efluente secundario filtrado, están resumidos en la tabla 4.9, que presenta los valores de entrada y salida

de los coliformes fecales y los respectivos valores en términos de remoción logarítmica y porcentaje.

**Tabla 4.9: Coliformes fecales sobrevivientes después de la desinfección UV, efluente secundario con filtración**

TRH, [s]	No, [NMP/ 100 ml]	N, [NMP/ 100 ml]	Remoción	
			-log(N/No)	%
1.011	2500400	50945	1.691	97.963
1.467	2500400	12078	2.316	99.516
1.936	2500400	3206	2.892	99.871
2.377	2500400	881	3.453	99.965
2.845	2500400	253	3.995	99.990
3.308	2500400	81	4.490	99.997

#### **4.3.2.4 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA NECESARIO PARA LA INACTIVACIÓN DE COLIFORMES FECALES, EFLUENTE SECUNDARIO CON FILTRACIÓN**

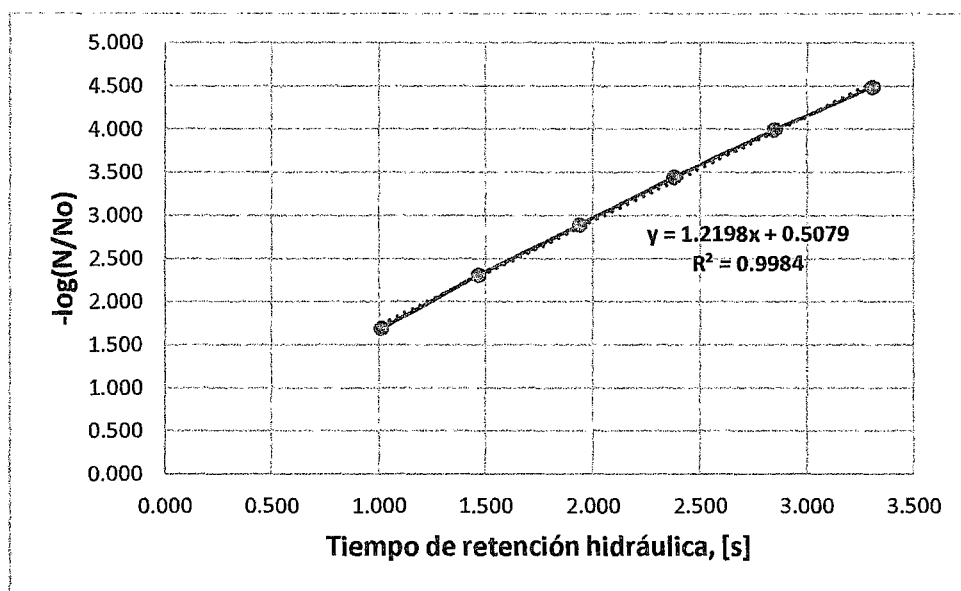
La tabla 4.10 presenta los resultados de los microorganismos sobrevivientes, (N) y datos para elaborar el gráfico para determinar el tiempo de inactivación de coliformes fecales.

A partir de los datos de la tabla 4.10 se obtiene el gráfico 4.3 que se ajusta a una línea recta con pendiente 0.686 e intercepto con el eje y de 0.907, con un coeficiente de correlación cercano a la unidad.

**Tabla 4.10: TRH y resultado bacteriológico de los coliformes fecales sobrevivientes, efluente secundario con filtración**

TRH, [s]	No, [NMP/ 100 ml]	N, [NMP/ 100 ml]	-log(N/No)
1.011	2500400	50945	1.691
1.467	2500400	12078	2.316
1.936	2500400	3206	2.892
2.377	2500400	881	3.453
2.845	2500400	253	3.995
3.308	2500400	81	4.490

Para determinar los TRH de inactivación de coliformes fecales del agua tratada del efluente secundario con filtración se utilizó el mismo procedimiento aplicado en la determinación del tiempo de retención hidráulica necesario para la inactivación de los coliformes fecales del agua del efluente secundario sin filtración.



**Gráfico 4.3: Tiempo necesario para la inactivación de los coliformes fecales, efluente secundario con filtración**

La tabla 4.11 presenta los resultados de los tiempos de retención hidráulico para la inactivación de microorganismo coliformes fecales, agua del efluente secundario previamente filtrada si cumple con las norma aptas para agua de riego agrícola.

**Tabla 4.11: Resultado tiempos de retención hidráulica para la inactivación de coliformes fecales, efluente secundario con filtración, agua de riego agrícola**

Ecuación de la línea recta, gráfico 3: $y = 1.2198x + 0.5079$	
Coliformes fecales sobrevivientes	TRH de inactivación de coliformes fecales, [s]
Inactivación total: 1 NMP/100 ml	4.829
Riego de vegetales de tallo bajo: 1000 NMP/100 ml	2.369
Riego de vegetales de tallo alto: 2000 NMP/100 ml	2.123

#### 4.3.2.5 DOSIS NECESARIA PARA LA INACTIVACIÓN DE COLIFORMES FECALES, EFLUENTE SECUNDARIO CON FILTRACIÓN

**Potencia efectiva UV:**  $Pot_{efectiva} = 17 \times 0.65 = 11.05 \text{ W}$

**Intensidad de la fuente:**  $I_0 = \frac{Pot_{efectiva}}{Alámpara} = \frac{11.05}{245.04} = 0.0451 \frac{W}{cm^2}$

**Coefficiente de absorbancia:**  $\alpha = 2.303 \times A = 2.303 \times 0.31 = 0.714 \text{ cm}^{-1}$

**Espesor de la capa de agua del fotorreactor:**  $x = 1.85 \text{ cm}$

**Intensidad a través de la capa de agua:**

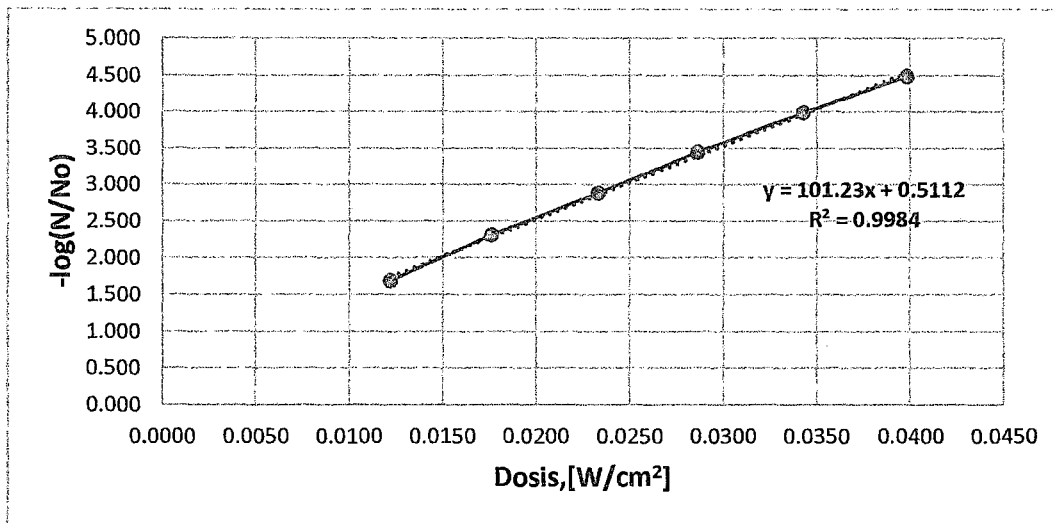
$$I = I_0 e^{-\alpha x} = 0.0451x e^{-0.714x1.85} = 0.01204 \frac{W}{cm^2}$$

**Dosis:**  $D = I \times TRH$

**Tabla 4.12: Dosis necesaria para la inactivación de coliformes fecales, efluente secundario con filtración**

TRH, [s]	I, [W/ cm <sup>2</sup> ]	Dosis, [W-s/cm <sup>2</sup> ]	- log(N/No)
1.011	0.01204	0.01217	1.691
1.467	0.01204	0.01766	2.316
1.936	0.01204	0.02331	2.892
2.377	0.01204	0.02862	3.453
2.845	0.01204	0.03425	3.995
3.308	0.01204	0.03983	4.490

Si se plotea los valores de  $-\log(N/N_0)$  en función de la dosis se obtiene el gráfico 4.4 que contiene la línea recta de ecuación.



**Gráfico 4.4: Dosis necesaria para la inactivación de coliformes fecales, efluente secundario con filtración**

Esta línea recta tiene más pendiente (101.230; 66.565) y menos intercepto (05112; 1.4398) que la línea recta obtenida para la dosis de inactivación de microorganismos utilizando el efluente secundario sin filtración.



**Tabla 4.13: Resumen de la dosis necesaria en la inactivación de coliformes fecales, efluente secundario con filtración, riego de vegetales**

Ecuación de la línea recta, gráfico 4.4: $y = 101.230x + 0.5112$			
Coliformes fecales sobrevivientes	Dosis de inactivación de coliformes fecales		
		[W-s/cm <sup>2</sup> ]	[μW-s/cm <sup>2</sup> ]
Inactivación total: 1 NMP/100 ml	0.058251	58251	
Riego de vegetales de tallo bajo: 1000 NMP/100 ml	0.028517	28517	
Riego de vegetales de tallo alto: 2000 NMP/100 ml	0.025543	25543	

### Intensidad de radiación UV promedio

Aplicando la ecuación 2.11:

$$I_{\text{promedio}} = \frac{I_0}{\alpha x} (1 - e^{-\alpha x}) = \frac{0.0222}{0.748 \times 1.85} (1 - e^{-0.748 \times 1.85}) = 0.012 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

### 4.3.2.6 CONSTANTE DE VELOCIDAD DE REACCIÓN, EFLUENTE SECUNDARIO CON FILTRACIÓN

La ley de Chick-Watson, presenta la ecuación de diseño 4.4, para la cinética de inactivación de microorganismo.

$$\ln \frac{N}{N_0} = -k \cdot I \cdot t \quad [4.4]$$

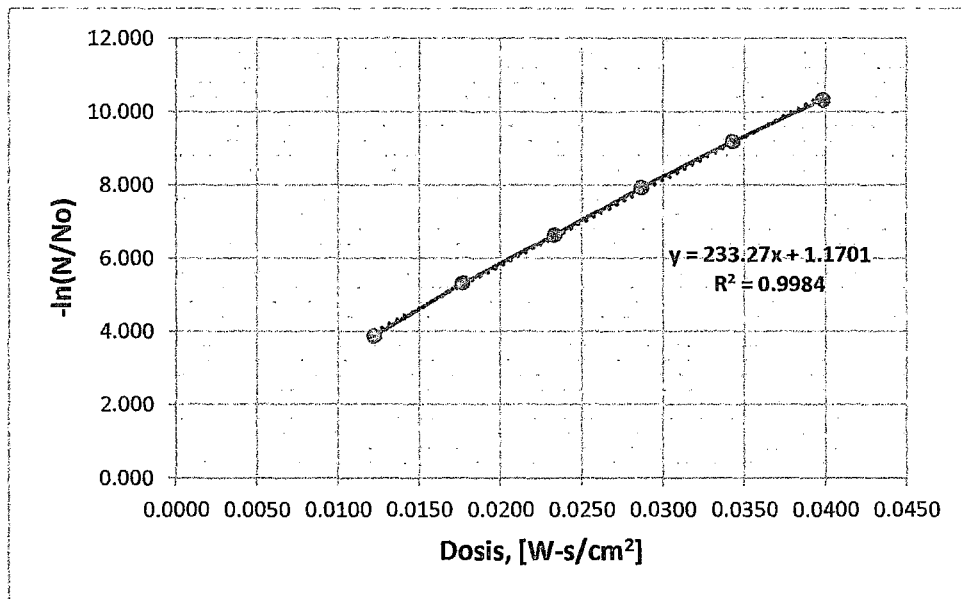
Como la intensidad (I) por el tiempo t (TRH) es igual a la dosis (D), la ecuación 4.4 se convierte en la ecuación 4.5.

$$\ln \frac{N}{N_0} = -k \cdot D \quad [4.5]$$

**Tabla 4.14: Resultados, dosis en función del  $\ln(N/N_0)$**

Dosis, [W-s/cm <sup>2</sup> ]	No, [NMP/ 100 ml]	N, [NMP/ 100 ml]	$-\ln(N/N_0)$
0.01217	2500400	50945	3.893
0.01766	2500400	12078	5.333
0.02331	2500400	3206	6.659
0.02862	2500400	881	7.951
0.03425	2500400	253	9.199
0.03983	2500400	81	10.338

Al graficar el valor de la relación  $-\ln(N/N_0)$  en función de la dosis de la tabla 4.14 y como indica la ecuación 4.5, se obtiene el gráfico 4.5.



**Gráfico 4.5: Constante de velocidad de reacción para la inactivación de microorganismos, efluente secundario con filtración**

El gráfico 4.5, presenta a una línea recta, cuya ecuación es:

$$y = 233.27x + 1.1701 \quad [4.6]$$

La pendiente de la ecuación 4.6, representa la constante de velocidad de reacción (k) o constante de decaimiento o inactivación, por consiguiente,

$$k = 233.27 \frac{cm^2}{W - s}$$

$$k = 0.233 \times 10^{-3} \frac{cm^2}{\mu W - s}$$

## V. DISCUSIÓN

En la siguiente sección se presenta la discusión de los resultados en base a la revisión de la literatura consultada, así como la interpretación y discusión según los objetivos planteados.

### 5.1. TIEMPO Y CAUDAL PROMEDIO

#### COEFICIENTES DE CORRELACIÓN

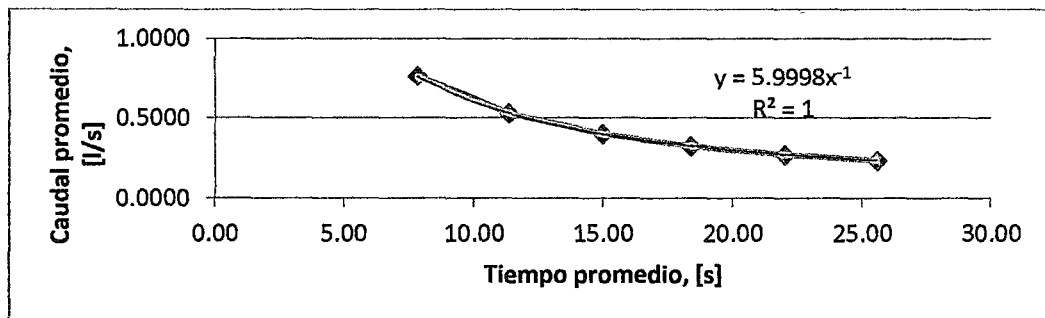
**Tabla 5.1: Coeficientes de correlación para ajustar la curva de  $Q_P$  en función  $t_p$**

Curva	Ecuación	Coefficiente de correlación
Exponencial	$y = 1.153 e^{-0.08 x}$	$R^2 = 0.970$
Lineal	$y = -0.028 x + 0.892$	$R^2 = 0.888$
Logarítmica	$y = -0.44 \ln(x) + 1.640$	$R^2 = 0.971$
Polinómica	$y = 0.001 x^2 - 0.089 x + 1.338$	$R^2 = 0.990$
Potencial	$Y = 5.999x^{-1}$	$R^2 = 1.000$

La tabla 5.1 presenta los diferentes coeficientes de correlación cuando se grafica el caudal promedio en función del tiempo promedio de la tabla 4.1, para diferentes tipos de curva.

## CURVA POTENCIAL DEL $Q_P$ vs $t_P$

La figura 5.1 presenta la curva potencial al plotear el caudal promedio en función del tiempo promedio, curva seleccionada a partir de la tabla 5.1, en la cual se puede observar que el coeficiente de correlación más cercano a la unidad es el ajuste con la curva potencial.



**Gráfico 5.1: Caudal promedio  $Q_P$ , en función del tiempo promedio  $t_P$ , para un volumen de 6 litros**

El gráfico 5.1 es importante para la discusión de resultados de los TRH y dosis de inactivación de microorganismos.

## 5.2 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA, TRH

Los resultados de la tabla 4.2, muestra que cuando se va cerrando la válvula se llega a estados en transición que son estados inestables y lo mejor sería llegar a modelos de flujo laminar ( $N_{Re} < 2000$ ), porque se alcanzarían nuevos estados estables. Los ingenieros siempre buscan que los procesos se realicen en menor tiempo, por ello se debe buscar un mejor valor entre los modelos de flujo turbulento y la realidad del modelo de flujo de la PTAR Totorá. En los sistemas tradicionales de flujo paralelo, la residencia al flujo es relativamente alta y con una variación muy amplia de tiempos de 0.25 a 2.75 s, esto asegura un flujo laminar excelente a través de la

unidad, [Orta, 1966], afirmación que colabora con los resultados obtenidos en los ensayos para el TRH, si se sigue cerrando la válvula de control se obtendría flujos laminares.

## VELOCIDAD PROMEDIO

La velocidad promedio a través de la corona circular se puede calcular aplicando la ecuación 5.1.

$$\bar{u} = \frac{Q}{A} \quad [5.1]$$

donde,

$\bar{u}$  = velocidad promedio a través la corona circular, [m/s]

$Q$  = caudal, [m<sup>3</sup>/s]

$A$  = área de flujo del fluido (corona circular), [m<sup>2</sup>]

El número de Reynolds  $N_{Re}$ , se calculó aplicando la siguiente ecuación.

$$N_{Re} = \frac{\rho \bar{u} D_{eq}}{\mu} \quad [5.2]$$

donde,

$\rho$  = densidad del fluido líquido, [kg/m<sup>3</sup>]

$\bar{u}$  = velocidad promedio a través la corona circular, [m/s]

$D_{eq}$  = diámetro equivalente de la corona circular, [m]

$\mu$  = viscosidad absoluta del fluido, [Pa-s].

El estudio del TRH, es muy importante porque relaciona el tiempo de permanencia del fluido dentro del reactor para flujos continuos estables e irradiado por radiación UV del fotorreactor. Los resultados obtenidos a partir de los ensayos revelan que el reactor piloto de desinfección UV probado se comporta como un reactor de tipo flujo pistón ideal de mezcla completa transversal con modelo de flujo turbulento que puede llegar a flujo laminar, sin dispersión en la dirección del flujo,

produciendo un reciclo interno del fluido, sin corto circuito y un mínimo de volumen muerto. Los TRH del estudio guarda relación con el trabajo de investigación sobre el tema por **Divino, 2007**, que utiliza un fotorreactor de radiación UV, para desinfectar piscinas de hidroterapia en un ambiente cerrado.

Según **Downey et al., 1998** citado por **Gomes, 2008**, un reactor de mezcla completa, no sería recomendado para la desinfección UV, por las condiciones de flujo, un volumen del líquido puede entrar al reactor y en una pequeña fracción de tiempo salir del sistema sin recibir la dosis UV adecuada, mientras que otras porciones del líquido puede permanecer en el reactor por períodos de tiempo mucho más largo. El diseño recomendable para reactores UV convencional es el que opera con flujo pistón, que permite a cada elemento del líquido residente en el reactor estar el mismo período de tiempo. La utilización de un reactor tipo flujo pistón fue tomado en cuenta del trabajo de investigación de **Moura, 2000**, que concluye que en todo flujo pistón las partículas que se mueven a través del reactor reciben una dosis equivalente de radiación en todos los puntos.

### COEFICIENTE DE CORRELACIÓN $Q_P$ vs TRH

**Tabla 5.2: Coeficientes de correlación para ajustar la curva de  $Q_P$  en función del TRH**

Curva	Ecuación	Coefficiente de correlación
Exponencial	$y = 1.153 e^{-0.50 x}$	$R^2 = 0.970$
Lineal	$y = -0.218 x + 0.892$	$R^2 = 0.888$
Logarítmica	$y = -0.44 \ln(x) + 0730$	$R^2 = 0.971$
Polinómica	$y = 0.11 x^2 - 0.893 x + 1.337$	$R^2 = 0.990$
Potencial	$Y = 0.775 x^{-1}$	$R^2 = 1.000$

La tabla 5.2 proporciona parámetros para ajustar la ecuación que se obtiene al plotear el caudal promedio en función del TRH de la tabla 4.2. En la tabla 5.2 se observa que el coeficiente de correlación que está más cerca a la unidad es el coeficiente de correlación para la curva potencial.

## CURVA POTENCIAL DEL $Q_p$ vs TRH

Del gráfico 5.2 presenta la curva potencial obtenida al plotear el caudal promedio en función del tiempo de retención hidráulica, curva seleccionada a partir de la tabla 5.2, en la cual se puede observar que el coeficiente de correlación más cercano a la unidad es el ajuste con la curva potencial. Del gráfico 5.2, a partir del tiempo de residencia hidráulica de desactivación de microorganismos se puede hallar el caudal promedio de flujo, porque a partir de ello permite la discusión de resultados de los TRH y dosis de inactivación de microorganismos.

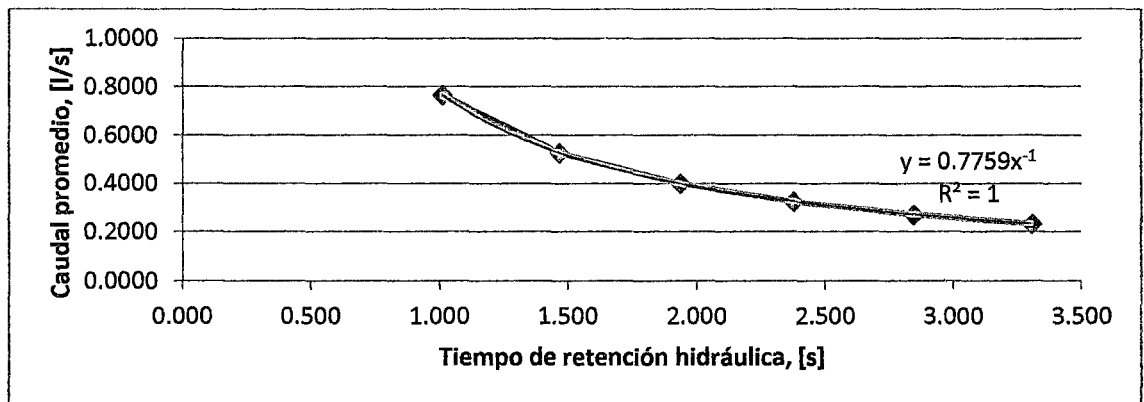


Gráfico 5.2: Caudal promedio  $Q_p$ , en función del tiempo de retención hidráulica, TRH

### 5.3 PROCESO DE DESINFECCIÓN CON RADIACIÓN UV

#### 5.3.1 PROCESO DE DESINFECCIÓN UV, EFLUENTE SECUNDARIO SIN FILTRACIÓN

##### 5.3.1.1 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO: PROCESO DE DESINFECCIÓN UV SIN FILTRACIÓN



La tabla 4.3 muestra que hubo una buena remoción de microorganismo y que los parámetros físico-químicos analizados no fueron afectados significativamente por la desinfección UV, premisa que está de acuerdo con el trabajo **Cherchinaro et al. 2001**, que concluye que los factores físico-químicos tales como pH, alcalinidad, temperatura y otros parámetros, no afecta a la inactivación de microorganismos por desinfección con UV. Al no ser afectados los parámetros físicos-químicos, esto indica que no se ha producido ninguna reacción química, premisa que también está de acuerdo con lo que concluye **Pasquali, 2008**, que la radiación UV ha sido ampliamente estudiada como método de desinfección de aguas por presentar una gran ventaja sobre la desinfección por cloro debido a que no deja subproductos tóxicos.

### **5.3.1.2 REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES**

Los resultados de la tabla 4.4 muestran que la desinfección por radiación UV sin filtración presenta algunas limitaciones para su uso en la desinfección de aguas tratadas, debido a la presencia alta de sólidos en suspensión, naturaleza del material particulado y baja eficiencia, premisa confirmada por **Caron, 2007, citado por Pascuali, 2008**, que manifiesta que los materiales en suspensión pueden servir de protección a los microorganismos, reduciendo la eficiencia del proceso.

Los resultados de la remoción alcanza solamente el 99.922 % a un TRH de 3.308 s, como la eficiencia es baja (< 99.999999) esto indica que es necesario un **post tratamiento vía tratamiento terciario antes de la desinfección**, para reducir los sólidos en suspensión y mejorar la desinfección del efluente.

### **5.2.1.3 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA NECESARIA PARA LA INACTIVACIÓN DE COLIFORMES FECALES, EFLUENTE SECUNDARIO SIN FILTRACIÓN**

#### **TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA DE INACTIVACIÓN TOTAL DE COLIFORMES FECALES**

Este caso significa inactivar todos los coliformes fecales, entonces  $N=0$ . Para el valor cero de coliformes fecales CF, es decir cuando se ha inactivado o eliminados todos los coliformes, la ecuación 4.1 no tiene solución porque el logaritmo de cero es un valor indeterminado, para su solución se tuvo que utilizar un artificio que consistió en admitir el valor de 1 NMP de CF/100 ml sobreviviente.

$$- \log \left( \frac{1}{7.0 \times 10^7} \right) = 0.5017 TRH + 1.4401$$

$$TRH = 12.767 \text{ s}$$

#### **TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA DE INACTIVACIÓN DE COLIFORMES FECALES, PARA REÚSO DE AGUA RIEGO VEGETALES DE TALLO BAJO**

El **D.S.002-2008-MINAM** norma los estándares nacionales de calidad ambiental para el agua, categoría 3, riego de vegetales y bebidas de animales, el valor para riego de vegetales de **tallo bajo**, exige el LMP de 1000 NMP de CF/100 ml, es decir el agua residual debe tener un máximo de 1000 NMP de CF/ 100 ml sobrevivientes después del tratamiento de desinfección. Aplicando la ecuación 4.1, determinamos el tiempo de retención hidráulica de inactivación de 1000 NMP de CF/100 ml sobrevivientes.

$$- \log \left( \frac{1000}{7.0 \times 10^7} \right) = 0.5017 TRH + 1.4401$$

$$TRH = 6.787 \text{ s}$$

## **TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA DE INACTIVACIÓN DE COLIFORMES FECALES, PARA REÚSO DE AGUA RIEGO DE VEGETALES DE TALLO ALTO**

El **D.S. 002-2008-MINAM** también norma los estándares de calidad de agua, categoría 3, riego de vegetales y bebidas de animales, para riego de vegetales de **tallo alto** con el LMP de 2000 NMP de CF/100ml. Aplicando la ecuación 4.1, determinamos el tiempo de retención hidráulica de inactivación de coliformes fecales 2000 NMP de CF/100 ml sobrevivientes después del tratamiento de desinfección.

$$-\log\left(\frac{2000}{7.0 \times 10^7}\right) = 0.5017 TRH + 1.4401$$

$$TRH = 6.187 s$$

Analizando los resultados obtenidos, los TRH varían inversamente proporcional con la cantidad de coliformes inactivados, es decir se necesita más TRH para que la inactivación sea mayor o total. El tiempo de retención hidráulica de exposición de los microorganismos a la radiación UV es otro factor limitante, está relacionada con la baja capacidad de penetración de la radiación UV que está relacionada a la vez a la configuración del reactor UV y a la intensidad de la radiación UV aplicada, [Gonçalves et al. 2003, citado por Pascuali 2008].

### **5.2.1.4 DOSIS NECESARIA PARA LA INACTIVACIÓN DE COLIFORMES FECALES, EFLUENTE SECUNDARIO SIN FILTRACIÓN**

#### **DOSIS DE INACTIVACIÓN TOTAL DE COLIFORMES FECALES**

Con la ecuación 4.2 determinamos la dosis de inactivación total de coliformes fecales, tomando la explicación que se hizo para la determinación del TRH de inactivación de coliformes.

$$- \log \left( \frac{1}{7.0 \times 10^7} \right) = 66.565 \text{ Dosis} + 1.4398$$

$$\text{Dosis} = 0.096226 \frac{W - s}{\text{cm}^2} = 96226 \frac{\mu W - s}{\text{cm}^2}$$

El valor obtenido de 96226  $\mu W-s/cm^2$  guarda relación con los valores presentados por Water Conditioning and Purification junio 1997 páginas: 38-42 Jesse Rodriguez.

### **DOSIS DE INACTIVACIÓN DE COLIFORMES FECALES, PARA REÚSO DE AGUA RIEGO DE VEGETALES DE TALLO BAJO**

Teniendo en cuenta el valor del **D.S. 002-2008-MINAM** que norma los estándares de calidad de agua, categoría 3, riego de vegetales y bebidas de animales, para riego de vegetales de **tallo bajo** con el LMP de 1000 NMP/100 ml. La dosis necesaria de inactivación hasta 1000 NMP de CF/100 ml sobrevivientes después del tratamiento de desinfección, se puede determinar aplicando la ecuación 4.2.

$$- \log \left( \frac{1000}{7.0 \times 10^7} \right) = 66.565 \text{ Dosis} + 1.4398$$

$$\text{Dosis} = 0.051157 \frac{W - s}{\text{cm}^2} = 51157 \frac{\mu W - s}{\text{cm}^2}$$

### **DOSIS DE INACTIVACIÓN PARA COLIFORMES FECALES, PARA REÚSO DE AGUA RIEGO DE VEGETALES DE TALLO ALTO**

Para vegetales de **tallo alto** el **D.S. 002-2008-MINAM** norma como estándar de calidad ambiental para el agua, categoría 3: riego de vegetales y bebidas de animales, el valor del parámetro de 2000 NMP de CF/100 ml sobrevivientes. La dosis necesaria de inactivación de 2000 NMP de CF/100 ml sobrevivientes, se puede determinar aplicando la ecuación 4.2.

$$-\log\left(\frac{2000}{7.0 \times 10^7}\right) = 66.565 \text{ Dosis} + 1.4398$$

$$\text{Dosis} = 0.046635 \frac{W - s}{\text{cm}^2} = 46635 \frac{\mu W - s}{\text{cm}^2}$$

Los resultados de la desinfección mediante radiación UV del agua del efluente secundario sin filtración, son muy próximas a las características de la desinfección por cloro. En cuanto a la remoción de coliformes fecales de  $7.0 \times 10^7$  a 54628 NMP/100 ml de sobrevivientes indica que estos valores, los TRH y la dosis de inactivación de microorganismos patógenos no cumple con los estándares de los LMP para el riego de vegetales tallo alto (2000 NMP/100 ml), menos para el riego de vegetales de tallo corto, (1000 NMP/100 ml) del **D.S. 002-2008-MINAM**, por consiguiente el agua desinfectada con este proceso UV, no es apta para riego agrícola, menos para una inactivación aceptable de microorganismos.

### **INTENSIDAD DE RADIACIÓN UV PROMEDIO**

Aplicando la ecuación 2.11:

$$I_{\text{promedio}} = \frac{I_0}{\alpha L} (1 - e^{-\alpha x}) = \frac{0.0451}{0.967 \times 1.85} (1 - e^{-0.967 \times 1.85}) = 0.021 \frac{W}{\text{cm}^2}$$

La determinación de la intensidad promedio explica la cantidad de potencia eléctrica por unidad de área que se ha utilizado en el proceso de desinfección por UV, este valor sirve para el diseño de un reactor más grande y cuantas lámparas UV se debe utilizar. La literatura recomienda para la desinfección de agua tratada de efluentes secundarios con UV esta debe tener un sistema de filtración.

## **5.3.2 PROCESO DE DESINFECCIÓN UV, EFLUENTE SECUNDARIO CON FILTRACIÓN**

### **5.3.2.1 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO Y BACTEREOLÓGICO ANTES Y DESPUÉS DE LA FILTRACIÓN**

En la tabla 4.7 se observa la disminución de los parámetros: DBO<sub>5</sub>, sólidos totales en suspensión y turbiedad, esto debido a la operación eficiente de los filtros. El resultado de la tabla 4.8 sobre los sólidos totales en suspensión muestra que el sistema de filtración removió de 286 a 51 mg/ml. **Pessôa y Jordan, 2005, citado por Dos Santos, 2012**, afirman que la radiación ultravioleta inactiva con mejor eficiencia a los microorganismos, cuando la concentración de sólidos totales en suspensión es preferentemente inferior a 10 mg/l. Cabe resaltar que en esta etapa se consiguió el mayor incremento de transmitancia con un aumento de 36.75 a 52.37 esto debido a la disminución de la turbiedad de 26.2 a 5.8 UNT. Estos valores están de acuerdo con la cuarta recomendación de **Aguirre, 2004** que dice que la transmitancia mínima debe ser próxima a 50- 60 % para una buena eficiencia de desinfección UV.

La desinfección UV es más eficaz para el agua con una turbiedad de poco valor, debido a la necesidad de penetración de la luz en el medio, por lo que la calidad del agua tratada es un factor importante en el uso de este proceso, [**Daniel, 1992**].

Según la **EPA, 2002** informa que la temperatura del agua tiene poca o ninguna influencia en la eficacia de la desinfección con luz ultravioleta y la turbiedad debe ser tan baja como sea posible y en todo caso, deben evitarse turbiedades mayores de 5 UNT, en la tabla 4.8 se puede observar que la turbiedad de 5.8 UNT, está cercana a valor de control de la EPA.

El proceso de filtración con carbón activado es un proceso de adsorción que ha sido citado como técnica promisoro debido a la producción de efluentes de alta calidad, alta capacidad de remoción de pululantes estables y por su viabilidad económica, cuando se compara con otras metodologías de tratamiento terciario del agua, [Sour, 2002, citado por Pasquali, 2008]. El carbón activado es uno de los materiales más citado en trabajos relacionados a la adsorción, debido a su costo relativamente bajo, siendo una opción en la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua, presenta un área superficial y porosidad elevada, tiene la capacidad para la adsorción de gases y compuestos dispersos en líquidos, [Oliveira et al., 2002].

#### **5.3.2.2 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO Y BACTERIOLÓGICO: PROCESO DE DESINFECCIÓN UV CON FILTRACIÓN**

En la tabla 4.8 se observa que en los parámetros fisico-químicos después de la desinfección UV con agua filtrada no tuvo variación significativa. También se puede observar que los parámetros: pH, temperatura, conductividad y coliformes fecales cumple con los LMP del **D.S. 002-2008-MINAM**, menos la DBO<sub>5</sub>; los sólidos totales en suspensión cumple con los LMP del **D.S. 003-2010-MINAM**, también se observa que la turbiedad tiene un valor bajo recomendado por varios investigadores e instituciones.

Por otra parte, se puede concluir que el agua desinfectada por este proceso UV puede ser usada para el riego agrícola, debido a la baja carga microbiana de las mismas, 81 NMP de CF/100 ml, parámetro que está por debajo de los LMP establecidos por el **D.S. 002-2008- MINAM** para aguas categoría 3, riego de vegetales de tallo bajo y alto y bebidas de animales.

### **5.3.2.3 REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES, PROCESO DE DESINFECCIÓN UV, EFLUENTE SECUNDARIO CON FILTRACIÓN**

Los resultados de la remoción alcanza el 99.997 % para un TRH de 3.308 s, si se compara con el proceso de desinfección sin filtración el porcentaje de remoción es más alto. Si este proceso continúa con TRH más grandes es probable que se pueda alcanzar un porcentaje del 99.999 % de remoción de microorganismos. El proceso de filtración asociado a la adsorción es una alternativa promisoro en el tratamiento de efluentes, pues a través de este proceso es posible obtener la remoción de metales como hierro, manganeso, arsénico, materia orgánica no biodegradable, sólidos en suspensión y disueltos además de microorganismos, [Morcira et. al., 2003]. Los resultados obtenidos de la tabla 4.8 muestran que los procesos de filtración fueron eficientes en la remoción de bacterias patógenas, DBO<sub>5</sub>, sólidos totales en suspensión y turbiedad, facilitando el proceso de desinfección UV. De esta forma los resultados de la utilización del tratamiento terciario con filtros de sedimentación y carbón activado mejoró la calidad del agua residual y la eficiencia de remoción de microorganismos, posibilitando así la reutilización de las aguas para la irrigación de todo tipo de vegetales, afirmación que está de acuerdo con Sánchez, 2012.

### **5.3.2.4 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA NECESARIO PARA LA INACTIVACIÓN DE COLIFORMES FECALES, EFLUENTE SECUNDARIO CON FILTRACIÓN**

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



**Tabla 5.3 TRH de inactivación de coliformes fecales**

Ecuación de la línea recta, gráfico 3: $y = 1.2198x + 0.5079$		
Coliformes fecales sobrevivientes		TRH de inactivación de coliformes fecales, [s]
Inactivación total:	1 NMP/100 ml	4.829
Riego de vegetales de tallo bajo:	1000 NMP/100 ml	2.369
Riego de vegetales de tallo alto:	2000 NMP/100 ml	2.123

De cualquier modo las exposiciones normales son del orden de 1 a 20 segundos, valores que informa la Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2002, si observamos los TRH que presenta la tabla 4.13 estos tiempos están dentro de la información de la OPS. Si comparamos los TRH de la sección 4.5.3.3, desinfección UV sin filtración del efluente secundario, TRH de inactivación total = 12.767 s, TRH de inactivación riego de vegetales de tallo bajo= 6.787 s y TRH de inactivación riego de vegetales de tallo alto = 6.187 s, estos TRH son más altos que la desinfección UV con efluente secundario filtrado tal como se puede comprobar en la tabla 5.3.

### **5.3.2.5 DOSIS NECESARIA PARA LA INACTIVACIÓN DE COLIFORMES FECALES, EFLUENTE SECUNDARIO CON FILTRACIÓN**

Se usó el mismo procedimiento para determinar la dosis de inactivación de coliformes fecales del efluente secundario sin filtración. A continuación se presenta en la tabla 5.4 los valores hallados. Según la OPS, 2002 la dosificación de luz

ultravioleta requerida para destruir los microorganismos más comunes (coliformes, pseudomonas y otros) varía entre 6000 y 10000  $\mu\text{W-s/cm}^2$  y las normas para la dosificación de luz ultravioleta en diferentes países varían entre 16000 y 38000  $\mu\text{W-s/cm}^2$ , los resultados obtenidos según la tabla 5.4 están dentro de los rangos de los límites máximos permisibles determinados por las Autoridades del Agua.

**Tabla 5.4 Dosis de inactivación de coliformes fecales**

<b>Ecuación de la línea recta, gráfico 4.4: <math>y = 101.230x + 0.5112</math></b>			
Coliformes fecales sobrevivientes		Dosis de inactivación de coliformes fecales	
		[W-s/cm <sup>2</sup> ]	[ $\mu\text{W-s/cm}^2$ ]
Inactivación total:	1 NMP/100 ml	0.058251	58251
Riego de vegetales de tallo bajo:	1000 NMP/100 ml	0.028517	28517
Riego de vegetales de tallo alto:	2000 NMP/100 ml	0.025543	25543

En definitiva, los resultados de segundo método confirman la calidad agronómica aceptable del efluente desinfectado y se concluye que esta agua se puede utilizar para riego agrícola sin restricciones y en particular para cultivos de consumo crudo.

### **5.3.2.6 CONSTANTE DE VELOCIDAD DE REACCIÓN, EFLUENTE SECUNDARIO CON FILTRACIÓN**

El valor de la constante de inactivación guarda relación con el valor de  $2.88 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\mu\text{W-s}$  obtenido en la investigación de **Moura, 2000**. También guarda relación con la información de **Pires et.al., 1998** presenta el valor de  $2.50 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\mu\text{W-s}$  para los coliformes fecales.

## CONCLUSIONES

En este apartado se presentan las conclusiones considerando los resultados obtenidos durante la fase de análisis, pruebas experimentales y los objetivos planteados al inicio del estudio.

Las conclusiones son las siguientes:

- La prueba de desinfección con radiación UV aplicada al agua del efluente secundario de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Totorá de Ayacucho mejoró en cuanto a calidad sanitaria para su reutilización en riego agrícola frente al método actual de desinfección por cloro.
- En el proceso experimental de desinfección UV del agua del efluente secundario sin filtración se obtuvo 54628 NMP/100 ml de coliformes fecales sobrevivientes para un TRH de 3.308 s, indicando el primer valor que este proceso de desinfección UV no es bueno para la reutilización del agua para riego agrícola tanto para vegetales de tallo alto y bajo. Al aplicar la ecuación de diseño para los LMP de 1000 y 2000 NMP/100 ml del DS-002-2008 MINAM, se obtuvieron 6.787 y 6.187 s para los TRH y 51157 y 46635  $\mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$  para la dosis de inactivación de microorganismos para agua de riego de vegetales de tallo bajo y alto respectivamente.
- En el proceso experimental de desinfección UV del efluente secundario con filtración se obtuvo 81 NMP/100 ml de coliformes fecales sobrevivientes para un TRH de 3.308 s y al aplicar la ecuación de diseño para 1000 y 2000 NMP/100 m, se obtuvieron 2.369 y 2.123 s para los TRH y 28517 y 25543  $\mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$  para la dosis de inactivación de microorganismos, resultados experimentales que

están dentro de los estándares de los LMP del **D.S. 002-2008-MINAM** para agua de riego tallo bajo y alto, técnicamente estos datos revelan que el fluido permanece el tiempo necesario para inactivar los microorganismos en el reactor UV para alcanzar la dosis requerida fluyendo a velocidad moderada con flujo turbulento, concluyendo que este proceso de desinfección UV si es bueno para la reutilización del agua para riego agrícola sin restricciones.

- Los ensayos para la determinación de los TRH (tiempo de retención hidráulica) que relaciona el tiempo de permanencia del fluido dentro del reactor demostraron que se presenta con flujos continuos estables y que el reactor piloto de desinfección UV se comporta como un reactor de tipo flujo pistón ideal con mezcla completa transversal, con modelo de flujo turbulento que puede llegar a flujo laminar, sin dispersión en la dirección del flujo y produciendo un reciclo interno del fluido, sin corto circuito y un mínimo de volumen muerto.
- Los resultados de la investigación demuestran técnica, económica, social y ambientalmente la factibilidad del proceso de desinfección UV, técnica porque el fotorreactor que produce la radiación UV es sencillo y de fácil manejo, económica porque la desinfección UV es 22 % menos costosa que la desinfección por cloro, social porque disminuye las enfermedades hídricas del poblador y por consiguiente el ahorro de dinero por atención en los hospitales y ecológica porque contribuye a la disminución de la contaminación ambiental del agua.
- Finalmente se concluye que el estudio de investigación del proceso de desinfección mediante radiación UV del efluente secundario de la PTAR Totorá es una alternativa de solución para la inactivación de los microorganismos patógenos y mejorar la calidad de agua para el riego agrícola sin restricciones en los valles de los ríos Alameda y Chacco de Ayacucho, siempre en cuando se implemente un proceso terciario de filtración usando como alternativa filtros como el utilizado en el trabajo de investigación.

## RECOMENDACIONES

Las próximas investigaciones que se desearían hacer en este campo, podrían beneficiarse con la experiencia obtenida en la realización de este trabajo, principalmente en la metodología empleada, materiales utilizados y resultados obtenidos. El enfoque presentado en este documento sugiere la posibilidad de realizar una serie de investigaciones para una mejor comprensión. Este hecho permite hacer las siguientes recomendaciones.

- Se debe realizar un proyecto a la brevedad posible de implementación de un tratamiento terciario después del efluente secundario, para mejorar el proceso de desinfección.
- Se recomienda a la Región Ayacucho o a una empresa privada prestadora de servicios, implementar el diseño propuesto en el presente trabajo, la misma que debe de ser verificada en cuanto al dimensionamiento estructural y la disponibilidad del terreno.
- Se debe prestar especial atención a los parámetros de coliformes fecales y sólidos suspendidos total, por estar relacionados con la incidencia de enfermedades y contaminación en la irrigación de vegetales que se consumen frescos.
- El método de cloración es el más utilizado, pero como el cloro reacciona con la materia orgánica en las aguas de desecho y en el agua superficial produce pequeñas cantidades de hidrocarburos cancerígenos, se debe estudiar profundamente si este método de desinfección está causando leucemia al poblador ayacuchano.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre Paula et al., [2004]. Desinfección con Cloro y Luz Ultravioleta en un Proceso Convencional de Regeneración de Agua. Revista de Ingeniería del Agua. Vol. 11. Nº1.- España.

Antolín Gutiérrez M. Elvira, [2014]. Tesis de maestría "Instalación de un Equipo de Desinfección de Agua de Riego Contaminada por *Ralstonia Solanacearum* por Radiación Ultravioleta en la Balsa de Soto de Cerrato. Universidad de Valladolid. Palencia-España.

APHA (American Public Health Association), [1998]. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA, Washington, DC, USA.

BNDES, [Maio de 1998]. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social: Modelagem de Desestatização do Setor de Saneamento Básico. Rio de Janeiro, IV volumes. Mimeo, Brasil.

Blatch Ley III, [1997]. Numerical Modeling of UV Intensity. Applications to Collimated-Beam Reactors and Continuous Flow Systems. Water Research. V.31, n.9.

Bolton J.R. [2000]. Calculation of Ultraviolet Fluence Rate Distributions in an Annular Reactor. Significance of Refraction and Reflexion. Water Research. V.34, Nº 13.

Brissaud Francois y Salgot Miguel, [Octubre 2005]. Orientaciones Comunitarias (UE) Sobre la Calidad de Aguas Regeneradas. Jornadas Técnicas: La Integración del Agua Regenerada en la Gestión de los Recursos. Gerona, España.

Chang R. [1997]. Physical Chemistry with Applications Biological Systems. Eda. Edición. New York. Macmillan Publishing Co. Inc.

Chernicharo A. L., et al., [1999]. Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios por Sistemas de Desinfecção. Pós-Tratamento de Efluentes Anaeróbios. PROSAB, Rio de Janeiro, cap.7. Desinfecção Ultra Violeta.

Carlino R.y Llovera V., [2011]. Tesis de Grado "Desarrollo de un Prototipo Purificador de Agua Autónomo Integrado a Través de Luz Ultravioleta por un Microcontrolador Utilizando un Módulo Fotovoltaico como Medio de Alimentación Respaldo por Tuberías". Universidad Nueva Esparta-República Bolivariana de Venezuela.

CEPIS, [2004]. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente "Avances del Inventario Regional de la Situación de las Aguas Residuales Domésticas en América Latina", Proyecto Regional USO, IDRC-CEPIS, Lima, Perú.

<http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaar/e/proyecto/Inventario>. Acceso mayo 2014

Daniel L. A; Campos, J.R., [1992]. Fundamentos e Aspectos de Projeto de Sistemas de Desinfecção de Esgoto Sanitário com Radiação Ultravioleta. Revista DAE-SABESP, n. 163, p.5-11.

Daniel, L.A., Campos, J. R. [1993]. Metodologia Simplificada para Determinação de Parâmetros Cinéticos de Desinfecção com Radiação Ultravioleta. In: Seminario Internacional, Desinfecção de Águas de Abastecimento e Residuárias em Países em Desenvolvimento, 1, Belo Horizonte- Brasil

Daniel L. A, [2000]. Processos de Desinfecção e Desinfectantes Alternativos na Produção de Água Potável. PROSAB, São Carlos-Brasil

Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, [2010]. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Vertidos de Efluentes a Cuerpos de Agua.

Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, [2008]. Límites Máximos Permisibles para las Aguas Categoría 3, Riego Vegetales de Tallo Bajo y Alto.

Díaz Díaz Francisco y Serrano Ortega Liliana, [2002]. Desinfección de Agua con Luz Ultravioleta. Germ-ex, Departamento de Ingeniería y Proyectos. Empresa Mexicana Localizada en la Ciudad de México, Dedicada Exclusivamente al Manejo de Tecnología UV. México.

DIGESA. Dirección General de Salud Ambiental. Lima 2014

Divino Lara D., [2007]. Utilização da Radiação Ultravioleta como Fonte Alternativa para Desinfecção de Piscinas de Hidroterapia em Ambiente Fechado (In Door). Teses de Mestre. Universidade de Ribeirão Preto-Brasil.

Dos Santos Borges Thais y De Souza Contar Thaisa, [2012]. Avaliação da Eficiência da Aplicação de radiação UV na Inativação de Coliformes Totais e Escherichia coli na ETE do Sucuri- Cuiabá/MT-Brasil

EPA, [1999a]. Folletos Informativos de Tecnología de Aguas Residuales de la EPA. Desinfección con luz Ultravioleta. Parte 1 y Parte 2.

Fujishima R.X.; Cai Otsuki; Hashimoto, Itoh; Yamashita y Kubota. *Electrochim. Acta*, 38, 153-157 (1993).

Gomes Lobo Mara, [2008]. Avaliação da Desinfecção de Água por Reator Utilizando Radiação Ultravioleta. Tese de Mestre. Universidade da Região de Joinville. Joinville-Brasil.

Legan R.W., [1980]. Disinfection Chambers. W&Sw. Reference Number 480

Ley General del ambiente [2005]. Ley N° 28611. Publicada el 15 de octubre 2005. Lima Perú.

Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29338, [31 marzo 2009]. Autoridad Nacional del Agua Calle Diecisiete N° 355, Urb. El Palomar, Lima 27-Perú

Metcalf & Eddy, [1998]. Ingeniería de Aguas Residuales, Volumen 1: Tratamiento, Vertido y Reutilización, Traducido de la Tercera Edición de Inglés. Editora MacGraw-Hill, Madrid-España.

Morcira R., et al. [2004]. Removal of Iron from Water Using Adsorbent Carbon. *Separation Science and Techno*, V.39. p. 267-281.

Moura de Souza Aguiar Alex, [2000], Avaliação do Emprego da Radiação Ultravioleta na Desinfecção de Águas com Cor e Turbidez Moderadas. Tesis de Mestre, Universidade Belo Horizonte- Brasil.

Oliveira W.Y., Gaglianone Y.R., Yassude P.S., Nogami B. Y. y Martins J. A., [2002]. Técnica de Abastecimiento y Tratamiento de Agua. 2ª Edición Brasil: CETESB, Vol. 1, Cap. 1, págs. 1-28.

Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia (OOAPAS), [2007]. Evaluación Socioeconómica del Saneamiento de Aguas Residuales de Morelia Mich.

Organización Mundial de la Salud OMS, [2004]. Agua, Saneamiento y Salud, Enfermedades Relacionadas con el Agua, La Carga de Enfermedad y los Estimados de Costo Eficacia. [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/diseases/burden/es/](http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/burden/es/). Acceso octubre 2014

Organización Mundial de la Salud OMS, [2004]. People and the Planet / Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos, "Hechos y cifras: Agua y Salud". <http://www.wateryear2003.org/es/ev>. Acceso octubre 2014.



- Organización Panamericana de la Salud OPS, [2002]. Desinfección del Agua. Lima Perú.
- Organización Panamericana de la Salud OPS, [2007]. Guía para la Selección de Sistema de Desinfección. Lima- Perú.
- Orta Teresa, Morales Jacinto y Monje Ignacio, [1996]. Desinfección de Aguas Residuales por Luz UV de Tratamiento Físico Químico o Biológico para uso Agrícola. Instituto de Ingeniería, UNAM Ciudad Universitaria, Coyoacán, México.
- Pantoja J./Proal M./García I./Chairez G./Osorio L., [2015]. Eficiencias Comparativas de Inactivación de Bacterias Coliformes en Efluentes Municipales por Fotólisis (UV) y por Fotocatálisis (UV/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>). Caso: 22, Depuradora de Aguas de Salamanca, España. Revista Mexicana de Ingeniería Química. Vol. 14. N° 1 (2015) 119-135. Salamanca-España.
- Pasquali Vargas G.D., [2008]. Tratamiento Terciario de Esgoto Sanitário Através de Processos Oxidativos Avançados para Obtenção de Águas de Reuso. Universidade Federal de Santa Catarina. Teses de Doutor. Florianópolis, S.C.-Brasil.
- Pietrobon Tarrán Elio, [2004]. Desinfección por Luz Ultravioleta. Empresa Water Quality Association. Sao Paulo, Brasil.  
<http://www.google.com.pe/search?hl=es&q=Empresa+Water+Quality+Association.+Sao+Paulo>. Acceso setiembre 2014.
- Prescott L, Harley J y Klein D., [1996] Microbiología. Editorial McGraw-Hill. Madrid, España.
- PROSAB, [2001]. Rede Cooperativa de Pesquisas. Métodos Alternativos de Desinfecção da Água. São Carlos-SP-Brasil.
- PROSAB, [2003]. Rede Cooperativa de Pesquisas. Desinfecção de Efluentes Sanitários, Remoção de Organismos Patógenos e Substâncias Nocivas. Aplicações para Fins Productivos como Agricultura, Aqüicultura e Hidroponia. Vitória-ES-Brasil.
- Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29338, [enero 2010].
- Reisman George, [2001]. Recursos Naturales y Medio Ambiente. Liberalismo.org.  
<http://www.liberalismo.org/articulo/293/29/42/recursos/naturales/medio/ambiente/>. Acceso noviembre 2014
- Rodrigues Camacho Paulo Rogério, [1995]. Desinfecção de Efluentes de Sistemas de Tratamentos de Esgotos Sanitários por Meio da Radiação ultravioleta. Teses de Mastre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear, Universidades de São Paulo.

Romero Antonio, [27 Septiembre 2008]. La EDAR de Arcos Depura al Año Dos Millones de Metros Cúbicos de Agua Residual. Empresa Concesionaria de Arcos y Aquala. Arcos de la Frontera, España.

<http://www.lavozdigital.es/cadiz/20080927/sierra/edar-arcos-depura-millones20080927.html>. Última visita enero 2015.

Ryer A.D.. [1997]. Light Measurement Handbook, 2da. Edición. Newburyport. Tecnical Publications International Ligth Inc, 64p.

Sánchez Mayra, [2012]. Diseño de un Equipo de Desinfección por Luz Ultravioleta para el Tratamiento de Aguas Residuales con Fines de Reutilización. Revista Tecnocientífica URU. Universidad Rafael Urdaneta-Venezuela.

Sandoval Yoal Luciano, [Mayo 2005]. Cultivo de Hortalizas con Agua Residual Tratada. XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Progreso, Juitepec, México.

Severin B. F., et al., [1984]. Mixing Effects in UV Disinfection. Wat Poll. Control Fed. J., p 1524-1531.

USEPA, [Abril 1999]. Guidance Manual. Alternative Disinfectantes and Oxidants, Office of Water, EPA 815-R-99-014, Cap. 8, pag. 8-1 - 8-25.

## APÉNDICE 1: CONTROL PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA PTAR TOTORA DE AYACUCHO

	DBO <sub>5</sub> (mg/L)				COLIFORMES FECALES (LMP/100ml)				ACEITES Y GRASAS (mg/L)				pH				SÓLIDOS TOTALES EN SUSPENSIÓN (mg/L)				TEMPERATURA (°C)			
	Afluente	Efluente	Río Alameda	Cuerpo Receptor	Afluente	Efluente	Río Alameda	Cuerpo Receptor	Afluente	Efluente	Río Alameda	Cuerpo Receptor	Afluente	Efluente	Río Alameda	Cuerpo Receptor	Afluente	Efluente	Río Alameda	Cuerpo Receptor	Afluente	Efluente	Río Alameda	Cuerpo Receptor
ene-15 14/01/15	340	25	10	30	5.0X10 <sup>8</sup>	2.0X10 <sup>3</sup>	1.2X10 <sup>5</sup>	2.1X10 <sup>6</sup>	-	-	-	-	7.30	7.90	7.40	7.80	312	16.0	25	32	19	20	20.5	21.0
Feb-15 11/02/15	322	22	15	25	2.0X10 <sup>7</sup>	1.0X10 <sup>3</sup>	2.2X10 <sup>4</sup>	3.0X10 <sup>4</sup>	-	-	-	-	7.22	7.98	7.36	7.52	218	18	66	90	19.2	19.9	20.5	21.5
Mar-15 13/03/15	390	36	25	55	3.0X10 <sup>8</sup>	5.0X10 <sup>3</sup>	3.X10 <sup>4</sup>	4.0X10 <sup>4</sup>	-	-	-	-	7.36	7.88	7.30	7.77	289	20	97	102	18.8	19.7	21.0	21.5
Abr-15 22/04/15	460	38	30	48	4.0X10 <sup>9</sup>	6.0X10 <sup>3</sup>	2.1X10 <sup>5</sup>	3.0X10 <sup>5</sup>	-	-	-	-	7.39	7.98	7.60	7.88	312	22	56	88	19.8	19.9	20.5	21.5
26/05/15	266	40.9	5	30	7.9X10 <sup>7</sup>	7.3X10 <sup>3</sup>	8.0X10 <sup>4</sup>	5.0X10 <sup>5</sup>	57.29	3.46	-	-	6.80	7.90	8.10	7.99	289	28	275	97	18.3	19.1	17.7	19.9
30/06/15	368	31	2	28	5.1X10 <sup>8</sup>	7.9X10 <sup>4</sup>	9.0X10 <sup>4</sup>	4.0X10 <sup>4</sup>	-	-	-	-	6.89	7.80	7.15	7.27	295	32	50	48	19.0	18.7	18.4	19.2
30/07/15	390	33	10	34	1.7X10 <sup>9</sup>	9.0X10 <sup>3</sup>	9.0X10 <sup>6</sup>	1.6X10 <sup>5</sup>	-	-	-	-	6.89	7.34	8.02	7.46	320.9	32.8	121	121.4	17.6	18.8	18.1	19.2
06/08/15	370	31	3	38	2.8X10 <sup>9</sup>	2.3X10 <sup>3</sup>	1.7X10 <sup>6</sup>	1.6X10 <sup>6</sup>	-	-	-	-	6.74	7.71	8.18	7.86	254	95.5	-	-	18.7	20.4	19.3	19.3
30/09/15	389	61.3	1	28	7.0X10 <sup>7</sup>	2.8X10 <sup>4</sup>	2.0X10 <sup>4</sup>	2.4X10 <sup>6</sup>	-	-	-	-	7.32	7.62	8.35	7.93	286	33	26.7	30	19.4	22.2	20.4	21.2
22/10/15	330	66.67	12	24	4.9X10 <sup>7</sup>	7.8	4.1X10 <sup>5</sup>	4.0X10 <sup>4</sup>	42.94	3.84	-	-	7.36	7.30	7.62	7.81	299	23	-	-	22.3	24.6	23.5	23.9
<b>* LMP</b>		<b>100</b>				<b>10000</b>				<b>20</b>				<b>6,5-8,5</b>				<b>150</b>				<b>35</b>		

# **DESINFECCIÓN DEL EFLUENTE SECUNDARIO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE AYACUCHO MEDIANTE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA CON FINES DE MEJORAR SU CALIDAD**

**Raúl R. Véliz Flores, Edgar G. Aronés Medina, Ybar G. Palomino Malpartida y Rudecindo Huincho Rodríguez**

## **RESUMEN**

El principal objetivo de la investigación fue realizar procesos de desinfección con radiación ultravioleta al agua tratada del efluente secundario de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Totorá de Ayacucho y comparar los resultados con los que obtiene la Planta Totorá en cuanto a microorganismos patógenos según las normas peruanas sobre vertidos de efluente y concluir si existe algún grado de mejoramiento del agua para riego agrícola.

Se realizaron dos tipos de pruebas experimentales para la desinfección UV, primero con agua del efluente secundario sin filtración y segundo con agua filtrada. Las pruebas de desinfección sin filtración, presentó poca eficiencia en cuanto a la remoción de microorganismos, 54628 NMP/100 ml, no alcanzando la calidad sanitaria para riego de vegetales, según los límites máximos permisibles del D.S. 002-2008-MINAM. Las pruebas experimentales de desinfección UV con agua filtrada mediante dos filtros instalados en serie el primero de sedimentación y el segundo de carbón activado mejoró notablemente la eficiencia de la desinfección

y reducción de microorganismos patógenos, 81 NMP/100 ml, cumpliendo el agua desinfectada con los estándares de instituciones como la EPA, OMS y de la norma peruana, con el segundo método se obtuvo agua de buena calidad sanitaria que se puede reutilizar para riego agrícola sin restricciones.

**Palabras claves:** Desinfección UV; radiación UV; calidad de agua agrícola; PTAR; diseño de proceso.

## **ABSTRACT**

The main objective of the research was conducted disinfection processes with ultraviolet radiation to the treated water from secondary effluent treatment plant Wastewater Totora Ayacucho and compare the results with those obtained by the Totora plant as pathogenic microorganisms according to the rules Peruvian effluent discharges and on to conclude whether there is some degree of improvement of water for agricultural irrigation.

Two types of experimental tests for UV disinfection, the first secondary effluent water without filtration and second filtered water were made. The disinfection tests without filtration showed little efficiency in terms of removal of microorganisms, 54,628 MPN / 100 ml and not reaching the sanitary quality for irrigating as the maximum permissible limits of D.S. 002-2008-MINAM. Experimental tests UV disinfection with water filtered by two filters installed in series the first sedimentation and the second activated carbon significantly improved disinfection efficiency and reduction of pathogens, 81 NMP / 100 ml, provided the water disinfected with standards institutions such as the EPA, WHO and the Peruvian rule, with the second method of good sanitary quality water that can be reused for agricultural irrigation unrestricted obtained.

**Keywords:** UV disinfection; UV radiation; agricultural water quality; WWTP; design process.

## I. INTRODUCCIÓN

Cuando se reutilizan aguas residuales tratadas para procesos productivos o para riego agrícola especialmente para vegetales de tallo corto, el problema por lo general es más de índole microbiológico que químico. Los brotes epidémicos que afectan a los animales y al ser humano, han estado siempre asociados a la reutilización de agua residual de efluentes tratados deficientemente sin la garantía o fiabilidad del caso o sin desinfectar.

Las verduras cosechadas de las tierras de cultivo de los valles de los ríos Alameda y Chacco, son comercializadas en los mercados de la ciudad de Ayacucho y consumidas por los ciudadanos huamanguinos, los microorganismos patógenos y los parásitos no se eliminan así se laven bien las verduras, por lo que el consumo de verduras crudas trae consigo que las personas se enfermen y parasiten, siendo el parasitismo uno de los factores de desnutrición y pobreza en Ayacucho.

La PTAR Totorá utiliza el método clásico de desinfección por cloro, en el año 2015 el agua del efluente desinfectada de la PTAR vertida al río Alameda cumplió con la norma peruana de vertido de efluentes de plantas de tratamiento de agua residual, sobre todo en lo que se refiere a microorganismos patógenos, sin embargo como el agua es reutilizada para riego agrícola en muchos casos para riego de vegetales de tallo corto ésta no es apta para ese proceso, debido a que su calidad está por encima de los parámetros de los límites máximos permisibles que contiene la otra norma peruana para riego de vegetales de tallos cortos.

Como el agua del efluente de la planta Totorá no tiene la calidad para riego agrícola para vegetales de tallo corto, porque solamente cumple con la norma peruana de vertidos de efluentes, el efluente necesita un proceso de desinfección avanzado para disminuir la cantidad de microorganismos patógenos, tarea planteada en la presente investigación.

La radiación UV es actualmente considerada como una de las mejores alternativas de desinfección de aguas residuales, ya que el sistema tradicional de cloración produce subproductos peligrosos tales como las cloraminas, los trihalometanos y otros compuestos orgánicos clorados que afectan la salud humana y al medio ambiente, [Rodríguez, 1995]. La radiación UV presenta muchas ventajas, no requiere la utilización de productos químicos, presenta fácil operación y manejo. Sin embargo, también presenta un inconveniente cada vez más estudiado por los científicos la fotorreactivación.

El objetivo principal de la investigación fue realizar experimentalmente en un reactor de radiación UV la desinfección del agua del efluente secundario tratada de la PTAR Totorá de Ayacucho con la finalidad de estudiar la reducción de microorganismos patógenos, mediante dos procesos, uno realizando la desinfección del agua del efluente secundario y dos realizando antes un proceso de filtración mediante un filtro sedimentador y otro de carbón activado.



## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 MATERIALES, APARATOS Y EQUIPOS

- Aparato de pruebas de jarras
- Balanza analítica.
- Conductímetro.
- Cronómetro
- Equipo Kjeldahl
- Espectrofotómetro.
- Medidor de pH meter.
- Turbidímetro, HACH modelo 2100p.
- Materiales de vidrio
- Reactivos

### 2.2 METODOLOGÍA DEL PROCESO DE DESINFECCIÓN UV

El diseño de un proceso de desinfección mediante radiaciones UV se relaciona estrechamente con el equipo hidráulico y variables del proceso. Las principales consideraciones generales son las características físico-químicas y bacteriológicas, tiempo de retención hidráulica y dosis de inactivación de microorganismos.

### 2.3 VARIABLES REGISTRABLES Y UNIDADES DE ANÁLISIS

**Tabla 2.1 Parámetros analizados y métodos utilizados en el análisis físico-químico y microbiológico del efluente secundario de la PTAR Totorá, desinfección UV**

Variable y unidades	Descripción del método o equipo utilizado
---------------------	---

Absorbancia a la longitud de onda de 254 nm, [ $m^{-1}$ ]	Método espectrofotométrico. HACH, modelo DR/2010
Coliformes fecales, [NMP/100 ml]	Tubos múltiples
Conductividad, [ $\mu S/cm$ ]	Lectura automática. Conductímetro, XTECH
Demanda bioquímica de oxígeno	Método respirométrico
pH, [unidades de PH]	Medidor digital. HANNA
Sólidos totales en suspensión, [mg/l]	Filtrado con membrana 0.45 $\mu m$ , llevado a 102 °C, gravimétrico
Temperatura, [°C]	Lectura automática, Termómetro de mercurio de vidrio
Turbidez, [UTN]	Turbidímetro, HACH, modelo 2100p.

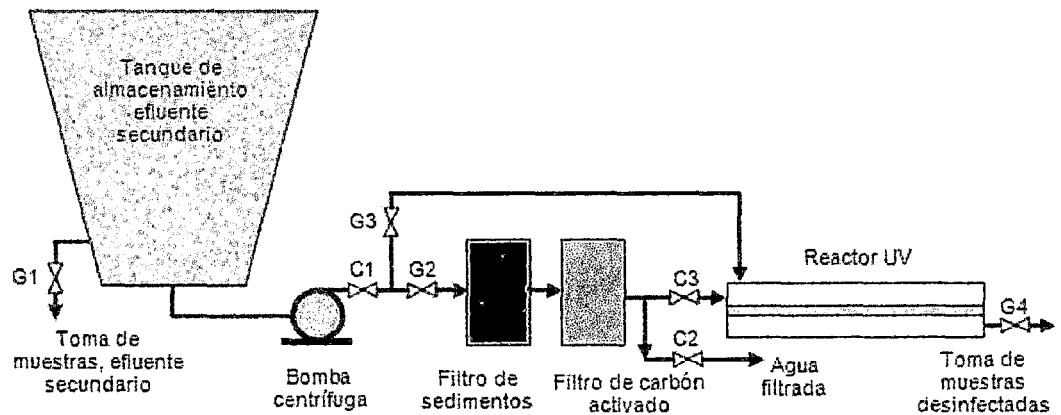
## 2.4 PROCEDIMIENTO PARA LA DESINFECCIÓN UV

Para el estudio de la desinfección por radiaciones UV, durante los experimentos se mantuvo constante algunas variables, otras fueron variadas y otras no controladas. Fueron monitoreados y controlados, el tiempo de retención hidráulica (TRH) y el caudal (Q). Como parámetros variables y monitoreados se estudió el régimen flujo laminar, transición o turbulento, concentración inicial de microorganismos, concentración de los sólidos totales en suspensión STS, DBO<sub>5</sub> y la temperatura, los demás parámetros fueron fijos. Según **Legan, 1980**, se debe buscar siempre que con la geometría del sistema y la configuración del equipo instalado se pueda obtener la mejor eficiencia en la desinfección.

## 2.5 DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD PILOTO DE DESINFECCIÓN UV

La unidad de desinfección piloto UV consta de un tanque de almacenamiento de 50 L, una bomba de alimentación, un filtro de sedimentos, un filtro de carbón activado

y un reactor de desinfección UV. El sistema de transporte tanque-bomba-reactor está unido por tuberías de PVC de ½ pulgada. El esquema piloto de desinfección UV se presenta en la figura 2.1.



**Figura 2.1. Esquema de la unidad piloto de desinfección UV**

## 2.6 PROCEDIMIENTO TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA

Se fijó un volumen de descarga de 6 litros en el tanque de almacenamiento para las pruebas de los tiempos promedios de descarga. En el tanque de almacenamiento internamente se marcó tres líneas que sirvieron para controlar el flujo de descarga, la primera línea fue marcada tomando como base la superficie libre del agua (parte superior del tanque), esta indica el inicio de la cantidad de fluido que se debe descargar para alcanzar el estado estable, la segunda línea marcada indica el inicio de descarga del volumen de 6 litros, aquí se activa el cronómetro, tomando el tiempo como tiempo igual a cero, la tercera línea marcada indica el final de descarga de los 6 litros, aquí se detiene el cronómetro y se lee el tiempo transcurrido. La variación del flujo del fluido de descarga se hizo manipulando el vástago de la válvula de globo G3, que controla el flujo de salida de la bomba, el proceso tanque-bomba-

reactor se puede seguir en la figura 2.1.

## **2.7 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE DESINFECCIÓN UV**

Los parámetros hidráulicos de funcionamiento y operación del equipo UV más importantes fueron monitoreados, los tiempos de residencia y caudales fueron controlados y variados mediante la manipulación del vástago de la válvula de globo, los demás parámetros fueron fijados por la geometría del sistema buscando siempre la mejor eficiencia de la desinfección de acuerdo con el estudio de **Legan, 1980**.

Se realizaron dos tipos de ensayos de desinfección UV:

### **Ensayos tipo 1:**

Con agua del efluente secundario directamente desinfectada utilizando el reactor piloto UV. Proceso: tanque-bomba-reactor.

### **Ensayos tipo 2:**

Con agua del efluente secundario previamente filtrada utilizando el equipo de filtración de sedimentación y equipo de filtración de carbón activado. Proceso: tanque-bomba-filtros. Luego, el agua filtrada fue cargada al tanque de almacenamiento para ser bombeada y desinfectada por el reactor UV. Proceso: tanque-bomba-reactor.

### III. RESULTADOS

#### 3.1 TIEMPO Y CAUDAL PROMEDIOS

**Tabla 3.1: Resultados de tiempos promedios y caudales para un volumen de 6 litros de descarga**

Vástago de la válvula, G3	Tiempos, [s]					Tiempo promedio, $t_p$ , [s]	Caudal promedio, $Q_p$ , [l/s]
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$		
Totalmente abierta	8.01	7.69	7.90	7.77	7.73	7.82	0.7673
¼ vuelta cerrada	11.36	11.47	11.32	11.02	11.53	11.34	0.5291
1/2 vuelta cerrada	14.98	14.68	15.35	14.81	15.03	14.97	0.4008
3/4 vuelta cerrada	18.35	18.66	18.02	18.71	18.16	18.38	0.3265
1 vuelta cerrada	21.89	22.15	22.01	21.70	22.20	21.99	0.2728
1 ½ vuelta cerrada	25.94	25.57	25.75	25.14	25.50	25.58	0.2346

**Tabla 3.2: Resultados de la prueba de los TRH y modelo de flujo**

Vástago de la válvula	Caudal promedio [l/s]	TRH, [s]	Número de Reynolds	Modelo de flujo
Totalmente abierta	0.7673	1.011	10063	Turbulento
¼ de vuelta cerrada	0.5291	1.467	6960	Turbulento
1/2 vuelta cerrada	0.4008	1.936	5249	Turbulento
3/4 vuelta cerrada	0.3265	2.377	4292	Turbulento
1 vuelta cerrada	0.2728	2.845	3596	Transición
1 ½ vuelta cerrada	0.2346	3.308	3074	Transición

#### 3.2 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA, TRH

**Tabla 3.3. Resultados de la prueba de los TRH y modelo de flujo**

Vástago de la válvula	Caudal promedio [l/s]	TRH, [s]	Número de Reynolds	Modelo de flujo
Totalmente abierta	0.7673	1.011	10063	Turbulento
¼ de vuelta cerrada	0.5291	1.467	6960	Turbulento
1/2 vuelta cerrada	0.4008	1.936	5249	Turbulento
3/4 vuelta cerrada	0.3265	2.377	4292	Turbulento
1 vuelta cerrada	0.2728	2.845	3596	Transición
1 ½ vuelta cerrada	0.2346	3.308	3074	Transición

### 3.3 PROCESO DE DESINFECCIÓN CON RADIACIÓN UV

#### 3.3.1 PROCESO DE DESINFECCIÓN UV: AGUA DEL EFLUENTE SECUNDARIO SIN FILTRACIÓN

**Tabla 3.4. Resultados de los análisis físico-químico y bacteriológico del proceso de desinfección UV, sin filtración**

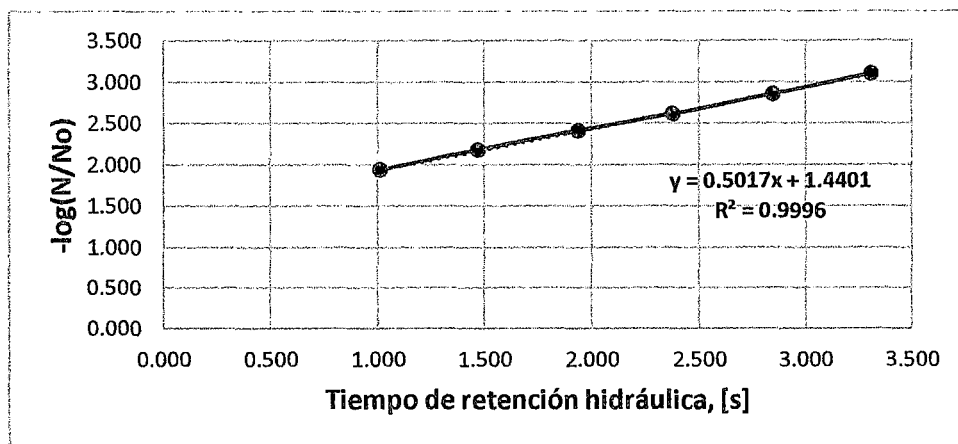
Parámetro	Fluido del efluente secundario, sin filtración	Fluido después del proceso de desinfección UV
Absorbancia, [cm <sup>-1</sup> ]	0.42	0.41
Coliformes fecales, [NMP/ 100 ml]	70000000	54628
Conductividad, [µS/cm]	610.4	612.7
DBO <sub>5</sub> , [mg de O <sub>2</sub> / ml]	389.0	371.8
pH, [unidades de pH]	7.32	7.30
Sólidos totales en suspensión, [mg/ml]	286	290
Temperatura, [°C]	19.4	19.5
Turbiedad, [UNT]	26.2	25.9

**Tabla 3.5: Resultado bacteriológico; coliformes fecales sobrevivientes después de la desinfección UV, agua efluente secundario sin filtración**

TRH, [s]	No, [NMP/ 100 ml] CF iniciales	N, [NMP/ 100 ml] CF sobrevivientes	Remoción	
			-Log(N/No)	%
1.011	70000000	800242	1.942	98.856
1.467	70000000	457088	2.185	99.347
1.936	70000000	267300	2.418	99.618
2.377	70000000	167109	2.622	99.761
2.845	70000000	96383	2.861	99.862
3.308	70000000	54628	3.107	99.922

**Tabla 3.6: TRH y resultado bacteriológico de los coliformes fecales sobrevivientes, agua efluente secundario sin filtración**

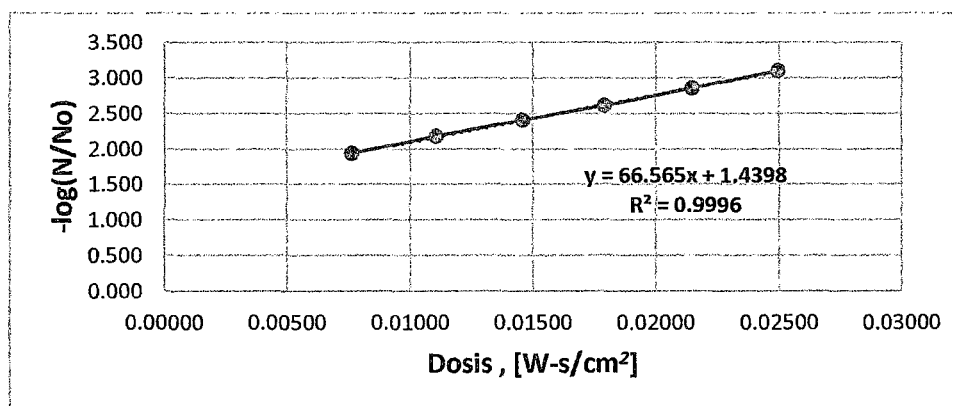
TRH, [s]	No, [NMP/ 100 ml]	N, [NMP/ 100 ml]	-log(N/No)
1.011	70000000	8000242	1.942
1.467	70000000	457088	2.185
1.936	70000000	267300	2.418
2.377	70000000	167109	2.622
2.845	70000000	96383	2.861
3.308	70000000	54628	3.107



**Gráfico 3.1: Tiempo necesario para la inactivación de coliformes fecales**

**Tabla 3.7: Resultado, dosis necesaria para la inactivación de coliformes fecales**

TRH, [s]	I, [W/ cm <sup>2</sup> ]	Dosis, [W-s/cm <sup>2</sup> ]	- log(N/No)
1.011	0.00754	0.00763	1.942
1.467	0.00754	0.01106	2.185
1.936	0.00754	0.01459	2.418
2.377	0.00754	0.01792	2.622
2.845	0.00754	0.02145	2.861
3.308	0.00754	0.02194	3.107



**Gráfico 3.2: Dosis necesaria para la inactivación de coliformes fecales**



### 3.3.2 PROCESO DE DESINFECCIÓN UV: AGUA EFLUENTE SECUNDARIO PREVIAMENTE FILTRADA

**Tabla 3.8 Resultados de los análisis físico-químico y bacteriológico del agua del efluente secundario y agua luego del proceso de filtrado**

Parámetro	Fluido del efluente secundario	Fluido filtrado
Absorbancia, [cm <sup>-1</sup> ]	0.42	0.31
Coliformes fecales, [NMP/ 100 ml]	70000000	2500400
Conductividad, [μS/cm]	610.4	285.6
DBOs, [mg de O <sub>2</sub> / ml]	389.0	78.4
pH, [unidades de pH]	7.32	7.51
Sólidos totales en suspensión, [mg/ml]	286	51
Temperatura, [°C]	19.4	20.3
Turbiedad, [UNT]	26.2	5.8
Transmitancia, [%]	36.75	52.37

**Tabla 3.9 Resultados de los análisis físico-químico y bacteriológico del proceso de desinfección por UV, con filtración**

Parámetro	Fluido del efluente secundario filtrado	Fluido después del proceso de desinfección UV
Absorbancia, [cm <sup>-1</sup> ]	0.31	0.29
Coliformes fecales, [NMP/ 100 ml]	2500400	81
Conductividad, [μS/cm]	285.6	283.9
DBOs, [mg de O <sub>2</sub> / ml]	78.4	35.73
pH, [unidades de pH]	7.51	7.50
Sólidos totales en suspensión, [mg/ml]	51	50

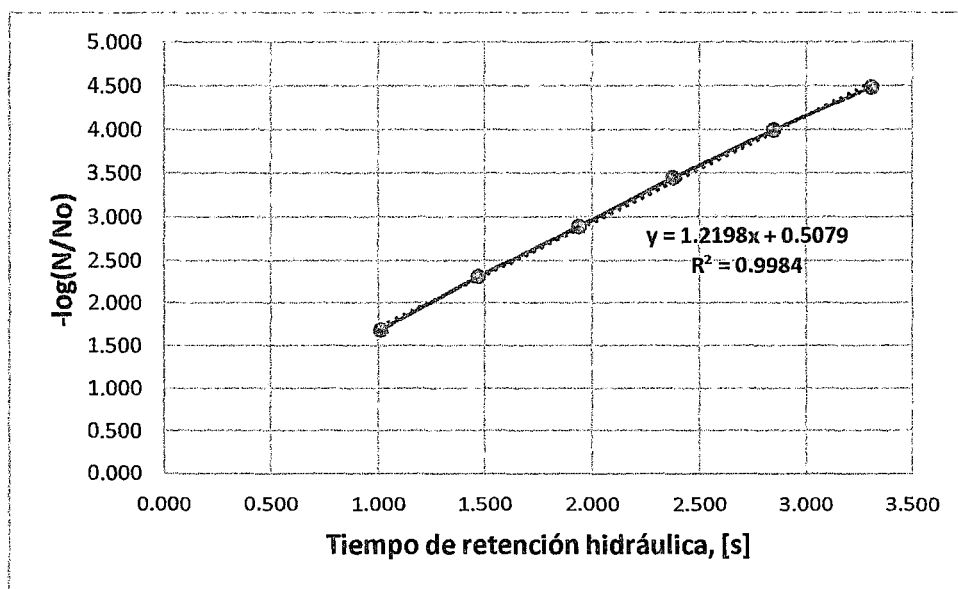
Temperatura, [°C]	20.3	20.2
Turbiedad, [UNT]	5.8	5.1

**Tabla 3.10: Coliformes fecales sobrevivientes después de la desinfección UV, efluente secundario con filtración**

TRH, [s]	No, [NMP/ 100 ml]	N, [NMP/ 100 ml]	Remoción	
			-log(N/No)	%
1.011	2500400	50945	1.691	97.963
1.467	2500400	12078	2.316	99.516
1.936	2500400	3206	2.892	99.871
2.377	2500400	881	3.453	99.965
2.845	2500400	253	3.995	99.990
3.308	2500400	81	4.490	99.997

**Tabla 3.11: TRH y resultado bacteriológico de los coliformes fecales sobrevivientes, efluente secundario con filtración**

TRH, [s]	No, [NMP/ 100 ml]	N, [NMP/ 100 ml]	-log(N/No)
1.011	2500400	50945	1.691
1.467	2500400	12078	2.316
1.936	2500400	3206	2.892
2.377	2500400	881	3.453
2.845	2500400	253	3.995
3.308	2500400	81	4.490



**Gráfico 3.3: Tiempo necesario para la inactivación de los coliformes fecales, efluente secundario con filtración**

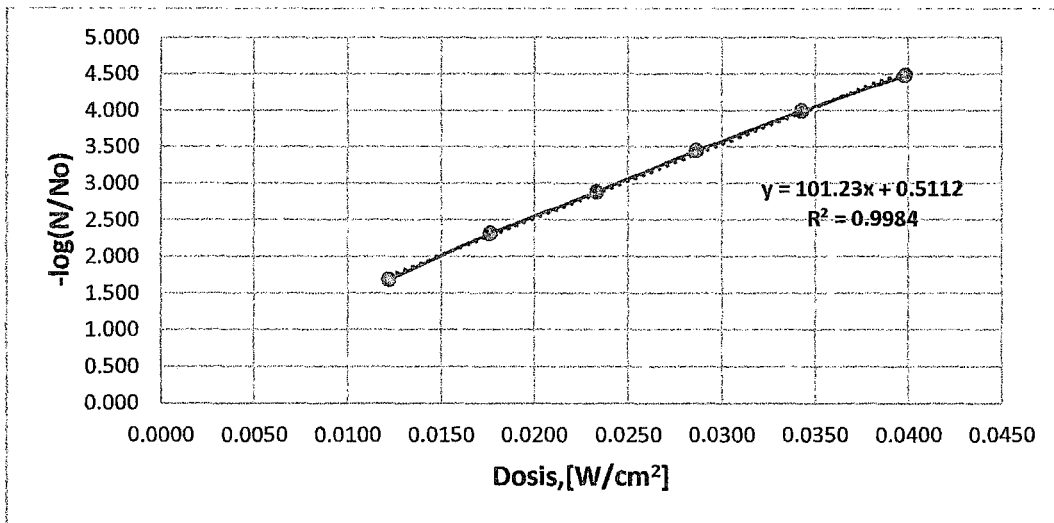
**Tabla 3.12: Resultado tiempos de retención hidráulica para la inactivación de coliformes fecales, efluente secundario con filtración, agua de riego agrícola**

Ecuación de la línea recta, gráfico 3: $y = 1.2198x + 0.5079$	
Coliformes fecales sobrevivientes	TRH de inactivación de coliformes fecales, [s]
Inactivación total: 1 NMP/100 ml	4.829
Riego de vegetales de tallo bajo: 1000 NMP/100 ml	2.369
Riego de vegetales de tallo alto: 2000 NMP/100 ml	2.123

**Tabla 3.13: Dosis necesaria para la inactivación de coliformes fecales, efluente secundario con filtración**

TRH, [s]	I, [W/ cm <sup>2</sup> ]	Dosis, [W-s/cm <sup>2</sup> ]	- log(N/No)

1.011	0.01204	0.01217	1.691
1.467	0.01204	0.01766	2.316
1.936	0.01204	0.02331	2.892
2.377	0.01204	0.02862	3.453
2.845	0.01204	0.03425	3.995
3.308	0.01204	0.03983	4.490



**Gráfico 3.4: Dosis necesaria para la inactivación de coliformes fecales, efluente secundario con filtración**

**Tabla 3.14: Resumen de la dosis necesaria en la inactivación de coliformes fecales, efluente secundario con filtración, riego de vegetales**

Ecuación de la línea recta, gráfico 4.4: $y = 101.230x + 0.5112$			
Coliformes fecales sobrevivientes		Dosis de inactivación de coliformes fecales	
		$[W-s/cm^2]$	$[\mu W-s/cm^2]$
Inactivación total:	1 NMP/100 ml	0.058251	58251

Riego de vegetales de tallo bajo: 1000 NMP/100 ml	0.028517	28517
Riego de vegetales de tallo alto: 2000 NMP/100 ml	0.025543	25543

### 3.4 CONSTANTE DE VELOCIDAD DE REACCIÓN, EFLUENTE SECUNDARIO CON FILTRACIÓN

Tabla 3.15: Resultados, dosis en función del  $\ln(N/N_0)$

Dosis, [W-s/cm <sup>2</sup> ]	No, [NMP/ 100 ml]	N, [NMP/ 100 ml]	$-\ln(N/N_0)$
0.01217	2500400	50945	3.893
0.01766	2500400	12078	5.333
0.02331	2500400	3206	6.659
0.02862	2500400	881	7.951
0.03425	2500400	253	9.199
0.03983	2500400	81	10.338

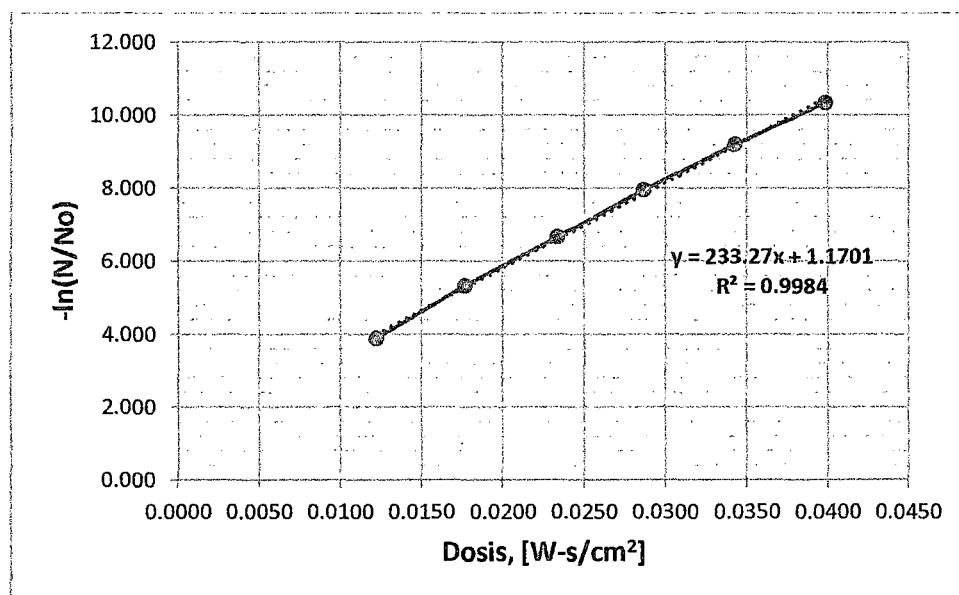


Gráfico 3.5: Constante de velocidad de reacción para la inactivación de

## IV. DISCUSIÓN

### 4.1. TIEMPO Y CAUDAL PROMEDIO

#### 4.1 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA, TRH

Los resultados de la tabla 3.2, muestra que cuando se va cerrando la válvula se llega a estados en transición que son estados inestables y lo mejor sería llegar a modelos de flujo laminar ( $N_{Re} < 2000$ ), porque se alcanzarían nuevos estados estables. Los ingenieros siempre buscan que los procesos se realicen en menor tiempo, por ello se debe buscar un mejor valor entre los modelos de flujo turbulento y la realidad del modelo de flujo de la PTAR Totorá. En los sistemas tradicionales de flujo paralelo, la residencia al flujo es relativamente alta y con una variación muy amplia de tiempos de 0.25 a 2.75 s, esto asegura un flujo laminar excelente a través de la unidad, [Orta, 1966], afirmación que colabora con los resultados obtenidos en los ensayos para el TRH, si se sigue cerrando la válvula de control se obtendría flujos laminares.

El estudio del TRH, es muy importante porque relaciona el tiempo de permanencia del fluido dentro del reactor para flujos continuos estables e irradiado por radiación UV del fotorreactor. Los resultados obtenidos a partir de los ensayos revelan que el reactor piloto de desinfección UV probado se comporta como un reactor de tipo flujo pistón ideal de mezcla completa transversal con modelo de flujo turbulento que puede llegar a flujo laminar, sin dispersión en la dirección del flujo, produciendo un reciclo interno del fluido, sin corto circuito y un mínimo de volumen muerto. Los TRH del estudio guarda relación con el trabajo de investigación sobre el tema por Divino, 2007, que utiliza un fotorreactor de radiación UV, para desinfectar piscinas de hidroterapia en un ambiente cerrado.

Según **Downey et al., 1998** citado por **Gomes, 2008**, un reactor de mezcla completa, no sería recomendado para la desinfección UV, por las condiciones de flujo, un volumen del líquido puede entrar al reactor y en una pequeña fracción de tiempo salir del sistema sin recibir la dosis UV adecuada, mientras que otras porciones del líquido puede permanecer en el reactor por períodos de tiempo mucho más largo. El diseño recomendable para reactores UV convencional es el que opera con flujo pistón, que permite a cada elemento del líquido residente en el reactor estar el mismo período de tiempo. La utilización de un reactor tipo flujo pistón fue tomado en cuenta del trabajo de investigación de **Moura, 2000**, que concluye que en todo flujo pistón las partículas que se mueven a través del reactor reciben una dosis equivalente de radiación en todos los puntos.

### **4.3 PROCESO DE DESINFECCIÓN CON RADIACIÓN UV**

#### **4.3.1 PROCESO DE DESINFECCIÓN UV, EFLUENTE SECUNDARIO SIN FILTRACIÓN**

La tabla 3.3 muestra que hubo una buena remoción de microorganismo y que los parámetros físico-químicos analizados no fueron afectados significativamente por la desinfección UV, premisa que está de acuerdo con el trabajo **Cherchinaro et al. 2001**, que concluye que los factores físico-químicos tales como pH, alcalinidad, temperatura y otros parámetros, no afecta a la inactivación de microorganismos por desinfección con UV. Al no ser afectados los parámetros físicos-químicos, esto indica que no se ha producido ninguna reacción química, premisa que también está de acuerdo con lo que concluye **Pasquali, 2008**, que la radiación UV ha sido ampliamente estudiada como método de desinfección de aguas por presentar una gran ventaja sobre la desinfección por cloro debido a que no deja subproductos tóxicos.

## REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES

Los resultados de la tabla 3.4 muestran que la desinfección por radiación UV sin filtración presenta algunas limitaciones para su uso en la desinfección de aguas tratadas, debido a la presencia alta de sólidos en suspensión, naturaleza del material particulado y baja eficiencia, premisa confirmada por **Caron, 2007, citado por Pascuali, 2008**, que manifiesta que los materiales en suspensión pueden servir de protección a los microorganismos, reduciendo la eficiencia del proceso.

Los resultados de la remoción alcanza solamente el 99.922 % a un TRH de 3.308 s, como la eficiencia es baja (< 99.999999) esto indica que es necesario un **post tratamiento vía tratamiento terciario antes de la desinfección**, para reducir los sólidos en suspensión y mejorar la desinfección del efluente.

### TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA DE INACTIVACIÓN TOTAL DE COLIFORMES FECALES

Este caso significa inactivar todos los coliformes fecales, entonces  $N=0$ . Para el valor cero de coliformes fecales CF, es decir cuando se ha inactivado o eliminados todos los coliformes, la ecuación a aplicar no tiene solución porque el logaritmo de cero es un valor indeterminado, para su solución se tuvo que utilizar un artificio que consistió en admitir el valor de 1 NMP de CF/100 ml sobreviviente.

$$-\log\left(\frac{1}{7.0 \times 10^7}\right) = 0.5017 TRH + 1.4401$$

$$TRH = 12.767 \text{ s}$$

### TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA DE INACTIVACIÓN DE COLIFORMES FECALES, PARA REÚSO DE AGUA RIEGO VEGETALES DE TALLO BAJO



El **D.S.002-2008-MINAM** norma los estándares nacionales de calidad ambiental para el agua, categoría 3, riego de vegetales y bebidas de animales, el valor para riego de vegetales de **tallo bajo**, exige el LMP de 1000 NMP de CF/100 ml, es decir el agua residual debe tener un máximo de 1000 NMP de CF/ 100 ml sobrevivientes después del tratamiento de desinfección. Determinamos el tiempo de retención hidráulica de inactivación de 1000 NMP de CF/100 ml sobrevivientes.

$$- \log \left( \frac{1000}{7.0 \times 10^7} \right) = 0.5017 TRH + 1.4401$$

$$TRH = 6.787 s$$

**TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA DE INACTIVACIÓN DE COLIFORMES FECALES, PARA REÚSO DE AGUA RIEGO DE VEGETALES DE TALLO ALTO**

El **D.S. 002-2008-MINAM** también norma los estándares de calidad de agua, categoría 3, riego de vegetales y bebidas de animales, para riego de vegetales de **tallo alto** con el LMP de 2000 NMP de CF/100ml. Determinamos el tiempo de retención hidráulica de inactivación de coliformes fecales 2000 NMP de CF/100 ml sobrevivientes después del tratamiento de desinfección.

$$- \log \left( \frac{2000}{7.0 \times 10^7} \right) = 0.5017 TRH + 1.4401$$

$$TRH = 6.187 s$$

Analizando los resultados obtenidos, los TRH varían inversamente proporcional con la cantidad de coliformes inactivados, es decir se necesita más TRH para que la inactivación sea mayor o total. El tiempo de retención hidráulica de exposición de los microorganismos a la radiación UV es otro factor limitante, está relacionada con la baja capacidad de penetración de la radiación UV que está relacionada a la vez a la configuración del reactor UV y a la intensidad de la radiación UV aplicada, [Gonçalves et al. 2003, citado por Pascuali 2008].

## **DOSIS DE INACTIVACIÓN TOTAL DE COLIFORMES FECALES**

Con la ecuación siguiente determinamos la dosis de inactivación total de coliformes fecales, tomando la explicación que se hizo para la determinación del TRH de inactivación de coliformes.

$$- \log \left( \frac{1}{7.0 \times 10^7} \right) = 66.565 \text{ Dosis} + 1.4398$$
$$\text{Dosis} = 0.096226 \frac{W - s}{\text{cm}^2} = 96226 \frac{\mu W - s}{\text{cm}^2}$$

El valor obtenido de 96226  $\mu W-s/cm^2$  guarda relación con los valores presentados por Water Conditioning and Purification junio 1997 páginas: 38-42 Jesse Rodriguez.

## **DOSIS DE INACTIVACIÓN DE COLIFORMES FECALES, PARA REÚSO DE AGUA RIEGO DE VEGETALES DE TALLO BAJO**

Teniendo en cuenta el valor del **D.S. 002-2008-MINAM** que norma los estándares de calidad de agua, categoría 3, riego de vegetales y bebidas de animales, para riego de vegetales de **tallo bajo** con el LMP de 1000 NMP/100 ml. La dosis necesaria de inactivación hasta 1000 NMP de CF/100 ml sobrevivientes después del tratamiento de desinfección, se puede determinar aplicando la ecuación 4.2.

$$- \log \left( \frac{1000}{7.0 \times 10^7} \right) = 66.565 \text{ Dosis} + 1.4398$$
$$\text{Dosis} = 0.051157 \frac{W - s}{\text{cm}^2} = 51157 \frac{\mu W - s}{\text{cm}^2}$$

## **DOSIS DE INACTIVACIÓN PARA COLIFORMES FECALES, PARA REÚSO DE AGUA RIEGO DE VEGETALES DE TALLO ALTO**

Para vegetales de **tallo alto** el **D.S. 002-2008-MINAM** norma como estándar de calidad ambiental para el agua, categoría 3: riego de vegetales y bebidas de animales, el valor del parámetro de 2000 NMP de CF/100 ml sobrevivientes. La dosis necesaria de inactivación de 2000 NMP de CF/100 ml sobrevivientes, se puede determinar,

$$- \log \left( \frac{2000}{7.0 \times 10^7} \right) = 66.565 \text{ Dosis} + 1.4398$$

$$\text{Dosis} = 0.046635 \frac{W - s}{\text{cm}^2} = 46635 \frac{\mu W - s}{\text{cm}^2}$$

Los resultados de la desinfección mediante radiación UV del agua del efluente secundario sin filtración, son muy próximas a las características de la desinfección por cloro. En cuanto a la remoción de coliformes fecales de  $7.0 \times 10^7$  a 54628 NMP/100 ml de sobrevivientes indica que estos valores, los TRH y la dosis de inactivación de microorganismos patógenos no cumple con los estándares de los LMP para el riego de vegetales tallo alto (2000 NMP/100 ml), menos para el riego de vegetales de tallo corto, (1000 NMP/100 ml) del **D.S. 002-2008-MINAM**, por consiguiente el agua desinfectada con este proceso UV, no es apta para riego agrícola, menos para una inactivación aceptable de microorganismos.

#### **4.3.2 PROCESO DE DESINFECCIÓN UV, EFLUENTE SECUNDARIO CON FILTRACIÓN**

En la tabla 3.7 se observa la disminución de los parámetros: DBO<sub>5</sub>, sólidos totales en suspensión y turbiedad, esto debido a la operación eficiente de los filtros. El resultado de la tabla 3.8 sobre los sólidos totales en suspensión muestra que el

sistema de filtración removi6 de 286 a 51 mg/ml. **Pess6a y Jordan, 2005, citado por Dos Santos, 2012**, afirman que la radiaci6n ultravioleta inactiva con mejor eficiencia a los microorganismos, cuando la concentraci6n de s6lidos totales en suspensi6n es preferentemente inferior a 10 mg/l. Cabe resaltar que en esta etapa se consigui6 el mayor incremento de transmitancia con un aumento de 36.75 a 52.37 esto debido a la disminuci6n de la turbiedad de 26.2 a 5.8 UNT. Estos valores est6n de acuerdo con la cuarta recomendaci6n de **Aguirre, 2004** que dice que la transmitancia m6nima debe ser pr6xima a 50- 60 % para una buena eficiencia de desinfecci6n UV. La desinfecci6n UV es m6s eficaz para el agua con una turbiedad de poco valor, debido a la necesidad de penetraci6n de la luz en el medio, por lo que la calidad del agua tratada es un factor importante en el uso de este proceso, **[Daniel, 1992]**.

Seg6n la **EPA, 2002** informa que la temperatura del agua tiene poca o ninguna influencia en la eficacia de la desinfecci6n con luz ultravioleta y la turbiedad debe ser tan baja como sea posible y en todo caso, deben evitarse turbiedades mayores de 5 UNT, en la tabla 34.8 se puede observar que la turbiedad de 5.8 UNT, est6 cercana a valor de control de la EPA. El proceso de filtraci6n con carb6n activado es un proceso de adsorci6n que ha sido citado como t6cnica promissora debido a la producci6n de efluentes de alta calidad, alta capacidad de remoci6n de pululantes estables y por su viabilidad econ6mica, cuando se compara con otras metodolog6as de tratamiento terciario del agua, **[Sour, 2002, citado por Pasquali, 2008]**. El carb6n activado es uno de los materiales m6s citado en trabajos relacionados a la adsorci6n, debido a su costo relativamente bajo, siendo una opci6n en la remoci6n de contaminantes org6nicos e inorg6nicos del agua, presenta un 6rea superficial y

porosidad elevada, tiene la capacidad para la adsorción de gases y compuestos dispersos en líquidos, [Oliveira et al., 2002].

En la tabla 3.8 se observa que en los parámetros físico-químicos después de la desinfección UV con agua filtrada no tuvo variación significativa. También se puede observar que los parámetros: pH, temperatura, conductividad y coliformes fecales cumple con los LMP del **D.S. 002-2008-MINAM**, menos la DBO<sub>5</sub>; los sólidos totales en suspensión cumple con los LMP del **D.S. 003-2010-MINAM**, también se observa que la turbiedad tiene un valor bajo recomendado por varios investigadores e instituciones.

Por otra parte, se puede concluir que el agua desinfectada por este proceso UV puede ser usada para el riego agrícola, debido a la baja carga microbiana de las mismas, 81 NMP de CF/100 ml, parámetro que está por debajo de los LMP establecidos por el **D.S. 002-2008- MINAM** para aguas categoría 3, riego de vegetales de tallo bajo y alto y bebidas de animales.

Los resultados de la remoción alcanza el 99.997 % para un TRH de 3.308 s, si se compara con el proceso de desinfección sin filtración el porcentaje de remoción es más alto. Si este proceso continúa con TRH más grandes es probable que se pueda alcanzar un porcentaje del 99.999 % de remoción de microorganismos. El proceso de filtración asociado a la adsorción es una alternativa promisoro en el tratamiento de efluentes, pues a través de este proceso es posible obtener la remoción de metales como hierro, manganeso, arsénico, materia orgánica no biodegradable, sólidos en suspensión y disueltos además de microorganismos, [Morcira et. al., 2003]. Los resultados obtenidos de la tabla 4.8 muestran que los procesos de

filtración fueron eficientes en la remoción de bacterias patógenas, DBO<sub>5</sub>, sólidos totales en suspensión y turbiedad, facilitando el proceso de desinfección UV. De esta forma los resultados de la utilización del tratamiento terciario con filtros de sedimentación y carbón activado mejoró la calidad del agua residual y la eficiencia de remoción de microorganismos, posibilitando así la reutilización de las aguas para la irrigación de todo tipo de vegetales, afirmación que está de acuerdo con **Sánchez, 2012**. Como cualquier otro desinfectante, el tiempo de exposición es vital para asegurar un buen desempeño de la desinfección.

**Tabla 4.1 TRH de inactivación de coliformes fecales**

Ecuación de la línea recta, gráfico 3: $y = 1.2198x + 0.5079$		
	Coliformes fecales sobrevivientes	TRH de inactivación de coliformes fecales, [s]
Inactivación total:	1 NMP/100 ml	4.829
Riego de vegetales de tallo bajo:	1000 NMP/100 ml	2.369
Riego de vegetales de tallo alto:	2000 NMP/100 ml	2.123

De cualquier modo las exposiciones normales son del orden de 1 a 20 segundos, valores que informa la Organización Panamericana de la Salud (**OPS**), **2002**, si observamos los TRH que presenta la tabla 3.13 estos tiempos están dentro de la información de la OPS. Si comparamos los TRH de la sección 4.5.3.3, desinfección UV sin filtración del efluente secundario, TRH de inactivación total = 12.767 s, TRH de inactivación riego de vegetales de tallo bajo= 6.787 s y TRH de inactivación riego de vegetales de tallo alto = 6.187 s, estos TRH son más altos que

la desinfección UV con efluente secundario filtrado tal como se puede comprobar en la tabla 4.3.

Se usó el mismo procedimiento para determinar la dosis de inactivación de coliformes fecales del efluente secundario sin filtración. A continuación se presenta en la tabla 4.2 los valores hallados. Según la **OPS, 2002** la dosificación de luz ultravioleta requerida para destruir los microorganismos más comunes (coliformes, pseudomonas y otros) varía entre 6000 y 10000  $\mu\text{W-s/cm}^2$  y las normas para la dosificación de luz ultravioleta en diferentes países varían entre 16000 y 38000  $\mu\text{W-s/cm}^2$ , los resultados obtenidos según la tabla 5.4 están dentro de los rangos de los límites máximos permisibles determinados por las Autoridades del Agua.

**Tabla 4.2 Dosis de inactivación de coliformes fecales**

<b>Ecuación de la línea recta, gráfico 4.4: <math>y = 101.230x + 0.5112</math></b>			
Coliformes fecales sobrevivientes		Dosis de inactivación de coliformes fecales	
		[W-s/cm <sup>2</sup> ]	[ $\mu\text{W-s/cm}^2$ ]
Inactivación total:	1 NMP/100 ml	0.058251	58251
Riego de vegetales de tallo bajo:	1000 NMP/100 ml	0.028517	28517
Riego de vegetales de tallo alto:	2000 NMP/100 ml	0.025543	25543

En definitiva, los resultados de segundo método confirman la calidad agronómica aceptable del efluente desinfectado y se concluye que esta agua se puede utilizar para riego agrícola sin restricciones y en particular para cultivos de consumo crudo.

#### 4.4 CONSTANTE DE VELOCIDAD DE REACCIÓN, EFLUENTE SECUNDARIO CON FILTRACIÓN

La pendiente de la línea recta de la gráfico 3.5, representa la constante de velocidad de reacción (k) o constante de decaimiento o inactivación, por consiguiente,

$$k = 233.27 \frac{cm^2}{W - s}$$

$$k = 0.233 \times 10^{-3} \frac{cm^2}{\mu W - s}$$

El valor de la constante de inactivación guarda relación con el valor de  $2.88 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\mu\text{W-s}$  obtenido en la investigación de **Moura, 2000**. También guarda relación con la información de **Pires et.at., 1998** presenta el valor de  $2.50 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\mu\text{W-s}$  para los coliformes fecales.

#### AGRADECIMIENTO

Manifestamos nuestro agradecimiento a la Planta de Tratamiento de Agua Residual Totorá de Ayacucho, EPSASA, especialmente al personal que en ella trabajan.



## CONCLUSIONES

- La prueba de desinfección con radiación UV aplicada al agua del efluente secundario de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Totora de Ayacucho mejoró en cuanto a calidad sanitaria para su reutilización en riego agrícola frente al método actual de desinfección por cloro.
- En el proceso experimental de desinfección UV del agua del efluente secundario sin filtración se obtuvo 54628 NMP/100 ml de coliformes fecales sobrevivientes para un TRH de 3.308 s, indicando el primer valor que este proceso de desinfección UV no es bueno para la reutilización del agua para riego agrícola tanto para vegetales de tallo alto y bajo. Al aplicar la ecuación de diseño para los LMP de 1000 y 2000 NMP/100 ml del DS-002-2008 MINAM, se obtuvieron 6.787 y 6.187 s para los TRH y 51157 y 46635  $\mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$  para la dosis de inactivación de microorganismos para agua de riego de vegetales de tallo bajo y alto respectivamente.
- En el proceso experimental de desinfección UV del efluente secundario con filtración se obtuvo 81 NMP/100 ml de coliformes fecales sobrevivientes para un TRH de 3.308 s y al aplicar la ecuación de diseño para 1000 y 2000 NMP/100 m, se obtuvieron 2.369 y 2.123 s para los TRH y 28517 y 25543  $\mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$  para la dosis de inactivación de microorganismos, resultados experimentales que están dentro de los estándares de los LMP del **D.S. 002-2008-MINAM** para agua de riego tallo bajo y alto, técnicamente estos datos revelan que el fluido permanece el tiempo necesario para inactivar los microorganismos en el reactor UV para alcanzar la dosis requerida fluyendo a velocidad moderada con flujo turbulento, concluyendo que este proceso de desinfección UV si es bueno para la reutilización del agua para riego agrícola sin restricciones.
- Los ensayos para la determinación de los TRH (tiempo de retención hidráulica) que relaciona el tiempo de permanencia del fluido dentro del

reactor demostraron que se presenta con flujos continuos estables y que el reactor piloto de desinfección UV se comporta como un reactor de tipo flujo pistón ideal con mezcla completa transversal, con modelo de flujo turbulento que puede llegar a flujo laminar, sin dispersión en la dirección del flujo y produciendo un reciclo interno del fluido, sin corto circuito y un mínimo de volumen muerto.

- Los resultados de la investigación demuestran técnica, económica, social y ambientalmente la factibilidad del proceso de desinfección UV, técnica porque el fotorreactor que produce la radiación UV es sencillo y de fácil manejo, económica porque la desinfección UV es 22 % menos costosa que la desinfección por cloro, social porque disminuye las enfermedades hídricas del poblador y por consiguiente el ahorro de dinero por atención en los hospitales y ecológica porque contribuye a la disminución de la contaminación ambiental del agua.
- Finalmente se concluye que el estudio de investigación del proceso de desinfección mediante radiación UV del efluente secundario de la PTAR Totorá es una alternativa de solución para la inactivación de los microorganismos patógenos y mejorar la calidad de agua para el riego agrícola sin restricciones en los valles de los ríos Alameda y Chacco de Ayacucho, siempre en cuando se implemente un proceso terciario de filtración usando como alternativa filtros como el utilizado en el trabajo de investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chernicharo A. L., et al., [1999]. Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios por Sistemas de Desinfecção. Pós-Tratamento de Efluentes Anaeróbios. PROSAB, Rio de Janeiro, cap.7. Desinfecção Ultra Violeta.

Daniel L. A; Campos, J.R., [1992]. Fundamentos e Aspectos de Projeto de Sistemas de Desinfecção de Esgoto Sanitário com Radiação Ultravioleta. Revista DAE-SABESP, n. 163, p.5-11.

Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, [2010]. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Vertidos de Efluentes a Cuerpos de Agua.

Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, [2008]. Límites Máximos Permisibles para las Aguas Categoría 3, Riego Vegetales de Tallo Bajo y Alto.

Dos Santos Borges Thais y De Souza Contar Thaisa, [2012]. Avaliação da Eficiência da Aplicação de radiação UV na Inativação de Coliformes Totais e Escherichia coli na ETE do Sucuri- Cuiabá/MT-Brasil.

EPA, [1999a]. Folletos Informativos de Tecnología de Aguas Residuales de la EPA. Desinfección con luz Ultravioleta. Parte 1 y Parte 2.

Gomes Lobo Mara, [2008]. Avaliação da Desinfecção de Água por Reator Utilizando Radiação Ultravioleta. Tese de Mestre. Universidade da Região de Joinville. Joinville-Brasil.

Legan R.W., [1980]. Dsunfection Chambers. W&Sw. Reference Number 480

Morcira R., et al. [2004]. Removal of Iron from Water Using Adsorbent Carbon. Separation Science and Techno, V.39. p. 267-281.

Moura de Souza Aguiar Alex, [2000], Avaliação do Emprego da Radiação Ultravioleta na Desinfecção de Águas com Cor e Turbidez Moderadas. Tesis de Mestre, Universidade Belo Horizonte- Brasil.

Oliveira W.Y., Gaglianone Y.R., Yassude P.S., Nogami B. Y. y Martins J. A., [2002]. Técnica de Abastecimento y Tratamiento de Agua. 2ª Edición Brasil: CETESB, Vol. 1, Cap. 1, págs. 1-28.

Organización Mundial de la Salud OMS, [2004]. People and the Planet / Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos, "Hechos y cifras: Agua y Salud". <http://www.wateryear2003.org/es/ev>. Acceso octubre 2014.

Organización Panamericana de la Salud OPS, [2002]. Desinfección del Agua. Lima Perú.

Organización Panamericana de la Salud OPS, [2007]. Guía para la Selección de Sistema de Desinfección. Lima- Perú.

Orta Teresa, Morales Jacinto y Monje Ignacio, [1996]. Desinfección de Aguas Residuales por Luz UV de Tratamiento Físico Químico o Biológico para uso Agrícola. Instituto de Ingeniería, UNAM Ciudad Universitaria, Coyoacán, México.

Pasquali Vargas G.D., [2008]. Tratamiento Terciario de Esgoto Sanitário Através de Processos Oxidativos Avançados para Obtenção de Águas de Reuso. Universidade Federal de Santa Catarina. Teses de Doutor. Florianópolis, S.C.-Brasil.

Pietrobon Tarrán Elio, [2004]. Desinfección por Luz Ultravioleta. Empresa Water Quality Association. Sao Paulo, Brasil.

<http://www.google.com.pe/search?hl=es&q=Empresa+Water+Quality+Association.+Sao+Paulo>. Acceso setiembre 2014.

PROSAB, [2001]. Rede Cooperativa de Pesquisas. Métodos Alternativos de Desinfecção da Água. São Carlos-SP-Brasil.

Rodrigues Camacho Paulo Rogério, [1995]. Desinfecção de Efluentes de Sistemas de Tratamentos de Esgotos Sanitários por Meio da Radiação ultravioleta. Teses de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear, Universidades de São Paulo.