

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Análisis de la influencia de la fotocatalisis heterogénea  
en la concentración de coliformes totales en las aguas  
residuales de la Planta de Tratamiento de Jauja**

Jessica Mary Terreros Castro

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniera Ambiental

Huancayo, 2022

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

## **ASESOR**

Mg. Edwin Natividad Gabriel Campos

## **AGRADECIMIENTOS**

Al magíster Edwin Natividad Gabriel Campos, por su constante guía y apoyo en la realización de este trabajo de investigación, quien con su experiencia y conocimiento supo encaminarme al buen desarrollo de este trabajo.

A los encargados del laboratorio de Biología Ambiental de la Universidad Continental, por brindarme apoyo en el análisis de muestras.

A mi querida familia y a todas aquellas personas que, de alguna u otra manera, me ayudaron al desarrollo de la tesis.

## **DEDICATORIA**

A Dios, por darme la oportunidad de vivir.

A mi padre, Edilberto Matías, que me cuida desde el cielo y me da la fortaleza necesaria para seguir adelante y cumplir mis objetivos.

A mi pequeña hija Valery, que es mi compañera y soporte en el desarrollo de mi carrera profesional.

# ÍNDICE

<b>PORTADA</b> .....	i
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	ii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iii
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	iv
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE GRÁFICOS</b> .....	viii
<b>RESUMEN</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	xi
<b>CAPÍTULO I</b> .....	12
<b>PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	12
1.1. Planteamiento del problema.....	12
1.2. Formulación del problema.....	14
1.2.1. Problema general.....	14
1.2.2. Problemas específicos.....	14
1.3. Objetivos.....	14
1.3.1. Objetivo general.....	14
1.3.2. Objetivos específicos.....	14
1.4. Justificación e importancia.....	15
1.4.1. Justificación teórica.....	15
1.4.2. Justificación práctica.....	15
1.4.3. Justificación económica.....	15
1.4.4. Importancia.....	15
1.5. Hipótesis y descripción de variables.....	16
1.5.1. Hipótesis general.....	16
1.5.2. Hipótesis específicas.....	16
1.5.3. Variables.....	16

<b>CAPÍTULO II</b> .....	19
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	19
2.1. Antecedentes nacionales.....	19
2.2. Antecedentes internacionales.....	21
2.3. Bases teóricas.....	23
2.3.1. Contaminación del agua.....	23
2.3.2. Marco normativo.....	25
2.3.3. Aguas residuales.....	28
2.3.4. Tratamiento de aguas residuales.....	31
2.3.5. Nuevas tecnologías aplicadas al tratamiento de aguas residuales.....	33
2.3.5.1. Proceso de oxidación avanzada (POA).....	33
2.3.5.2. Procesos fotoquímicos.....	34
2.3.5.2.1. Fotocatálisis.....	35
2.3.5.2.2. Fotocatálisis heterogénea.....	35
2.3.5.2.3. El dióxido de titanio (TiO <sub>2</sub> ).....	37
2.3.5.2.4. Acción bactericida de la fotocatalisis heterogénea TiO <sub>2</sub> .....	38
2.3.5.2.5. Parámetros que influyen en la fotocatalisis heterogénea con TiO <sub>2</sub> .....	39
2.4. Definición de términos básicos.....	40
<b>CAPÍTULO III</b> .....	43
<b>METODOLOGÍA</b> .....	43
3.1. Método, tipo y alcance de la investigación.....	43
3.1.1. Método de investigación.....	43
3.1.2. Tipo de investigación.....	43
3.1.3. Nivel o alcance.....	44
3.2. Diseño de la investigación.....	44
3.3. Población y muestra.....	45
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	46
3.4.4. Instrumentos de recolección de datos.....	46
3.5. Técnicas de análisis y procesamiento de datos.....	49

3.6. Diseño de la experimentación.....	49
3.6.1. Ubicación geográfica y descripción de la PTAR de Jauja.....	49
3.6.2. Metodología experimental.....	51
3.6.3. Procedimiento experimental.....	49
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>52</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>52</b>
4.1. Tratamiento de datos y análisis de la información.....	52
4.2. Prueba de hipótesis.....	60
4.3. Discusión de resultados.....	60
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>68</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>70</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>76</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Consumo y extracción a nivel mundial del agua.....	24
<b>Tabla 2.</b> LMP para efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.....	25
<b>Tabla 3.</b> ECA Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales.....	26
<b>Tabla 4.</b> Procesos Oxidativos Avanzados .....	33
<b>Tabla 5.</b> Diseño experimental.....	44
<b>Tabla 6.</b> Características presentadas por la empresa Superconcreto del Perú S.A de la PTAR de Jauja. .....	47
<b>Tabla 7.</b> Rangos usados para medir los parámetros.....	49
<b>Tabla 8.</b> Parámetros de medición a nivel del laboratorio.....	50
<b>Tabla 9.</b> Resultado de las muestras expuestas al proceso de fotocátalisis heterogénea.....	53
<b>Tabla 10.</b> Resumen del porcentaje de remoción a una concentración del catalizador $TiO_2$ de 0.03 g/L. .....	54
<b>Tabla 11.</b> Resumen del porcentaje de remoción a una concentración del catalizador $TiO_2$ de 0.04 g/L. .....	55
<b>Tabla 12.</b> Resumen del porcentaje de remoción a una concentración del catalizador $TiO_2$ de 0.05 g/L. .....	56
<b>Tabla 13.</b> Resumen del porcentaje de remoción a una concentración del catalizador $TiO_2$ de 0.06 g/L. .....	57
<b>Tabla 14:</b> Valores obtenidos de Coliformes Totales Finales menores a 100 NMP/100 ml.....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Componentes estructurales de un bacilo gramnegativo. E. coli.....	29
<b>Figura 2:</b> Representación general del tratamiento básico de las aguas residuales.....	30
<b>Figura 3:</b> Esquema de una laguna de estabilización facultativa.....	32
<b>Figura 4:</b> Reacciones fotoquímicas durante el proceso de fotocátalisis heterogénea.....	35
<b>Figura 5:</b> Espectro solar del $TiO_2$ en comparación con otros semiconductores.....	36
<b>Figura 6:</b> Formas cristalinas del $TiO_2$ .....	37
<b>Figura 7:</b> Diagrama del proceso de fotocátalisis con $TiO_2$ en microorganismos.....	38
<b>Figura 8.</b> Mapa de ubicación de la Planta de Tratamiento de Jauja.....	46
<b>Figura 9:</b> Diagrama de flujo del proceso de la toma de muestra.....	48

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Resultado de la influencia del pH en la concentración de coliformes totales.....	54
<b>Gráfico 2.</b> Porcentaje de remoción de CT en 0.03 g/L de $\text{TiO}_2$ .....	55
<b>Gráfico 3.</b> Porcentaje de remoción de CT en 0.04 g/L de $\text{TiO}_2$ .....	56
<b>Gráfico 4.</b> Porcentaje de remoción de CT en 0.05 g/L de $\text{TiO}_2$ .....	57
<b>Gráfico 5.</b> Porcentaje de remoción de CT en 0.05 g/L de $\text{TiO}_2$ .....	58
<b>Gráfico 6.</b> Porcentaje de remoción de coliformes vs Concentración del catalizador.....	58
<b>Gráfico 7.</b> Influencia de la fotocatalisis heterogénea en la concentración de CT.....	59
<b>Gráfico 8.</b> Representación gráfica del proceso de los valores de pH y el % de remoción de CT en el proceso de fotocatalisis heterogénea.....	63
<b>Gráfico 9.</b> Representación gráfica del proceso de los valores de pH y el % de remoción de CT en el proceso de fotocatalisis heterogénea.....	64

## RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo determinar la influencia que presenta el proceso de fotocátalisis heterogénea sobre la concentración de coliformes totales de las aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Jauja, analizando el grado de influencia de los parámetros que condicionan su funcionamiento como el pH, concentración del catalizador ( $\text{TiO}_2$ ) y la exposición a la radiación solar. El proceso de fotocátalisis heterogénea es una alternativa que permite solucionar los problemas causados por el vertimiento de aguas residuales que no cumplen con los estándares de calidad de agua descritos por la OMS para el reúso y/o aprovechamiento de estas en el sector agrícola.

En el desarrollo de esta tesis, se caracterizó las aguas residuales del efluente de la PTAR de Jauja a fin de determinar el número más probable (NMP) de coliformes; para ello, se tomó una muestra del efluente por un volumen de 20 litros, luego se realizó el análisis en el laboratorio de Biología Ambiental de la Universidad Continental y se obtuvo como valores iniciales una  $T^\circ$  de  $12,6^\circ\text{C}$ , pH de 6,6, y coliformes totales  $1,62 \times 10^3$  (NMP/100mL), para la muestra, posteriormente se realizaron 16 pruebas de laboratorio.

Desarrollando todas las pruebas, se ha podido evidenciar en los resultados experimentales y estadísticos, mediante el análisis de varianza ANOVA y Pearson, que la fotocátalisis heterogénea tiene un efecto en la concentración de coliformes totales, disminuyéndola, por lo que este proceso tendría una influencia positiva en la remoción o inactivación de los coliformes totales presentes en el agua residual de la PTAR de Jauja. En este mismo contexto, se pudo evidenciar que existe una influencia significativa de la concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$ , por lo que a mayor concentración  $0,06 \text{ g}/1000 \text{ ml}$  se obtiene mejores resultados, en tanto el pH y el tiempo de exposición a la radiación solar no tienen una gran influencia en el proceso individualmente, puesto que la variación de pH, en el proceso de 6 a 9, no ocasiona mucha diferencia, más si se recomienda valores entre 6 y 7 para realizar procesos de fotocátalisis, el tiempo de exposición de la muestra a la radiación solar por 6 horas ha permitido que la concentración de coliformes totales disminuyan hasta en un 98%, por lo que se sugiere, en futuras investigaciones, realizar pruebas utilizando diferentes intervalos de tiempo con la finalidad de determinar a qué tiempo de exposición se obtienen los resultados esperados.

## ABSTRACT

The objective of this work is to determine the influence that the heterogeneous photocatalysis process has on the concentration of total coliforms in the wastewater of the Jauja treatment plant, analyzing the degree of influence of the parameters that condition its operation such as pH, concentration catalyst (TiO<sub>2</sub>) and exposure to solar radiation. The heterogeneous photocatalysis process is an alternative that allows solving the problems caused by the discharge of wastewater that does not comply with the water quality standards described by the WHO for the reuse and / or use of these in the agricultural sector.

In the development of this thesis, the wastewater from the effluent of the Jauja WWTP was characterized in order to determine the most probable number (NMP) of coliforms, for this a sample of the effluent was taken for a volume of 20 liters, then it was carried out The analysis in the Environmental Biology laboratory of the Continental University and the initial values were a T ° of 12.6 ° C, pH of 6.6, and total coliforms 1.62x10<sup>3</sup> (NMP / 100mL), for the sample, subsequently 16 laboratory tests were carried out.

Developing all the tests, it has been possible to demonstrate in the experimental and statistical results through the ANOVA and Pearson analysis of variance, that heterogeneous photocatalysis has an effect on the concentration of total coliforms, decreasing it, therefore this process would have a positive influence on removal. or inactivation of the total coliforms present in the residual wáter of the Jauja. In this same context, it could be found that there is a significant influence of the concentration of the TiO<sub>2</sub> catalyst, so that at a higher concentration 0.06 g / 1000 ml, better results are obtained, as long as the pH and the time of exposure to solar radiation are not have a great influence on the process individually, since the variation of pH in the process from 6 to 9 does not cause much difference, especially if values between 6 and 7 are recommended to carry out photocatalysis processes, the exposure time of the sample to solar radiation for 6 hours has allowed the concentration of total coliforms to decrease by up to 98%, so it is suggested in future research to carry out tests using different time intervals in order to determine what exposure time is obtained the expected results.

# INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua por las descargas de aguas residuales sin tratamiento, o con tratamiento deficiente, ocasionan daños al medio ambiente, más aún si estas aguas contienen elevada carga microbiana, pues muchos de estos microorganismos son bacterias fecales como los coliformes totales causantes de graves enfermedades gastrointestinales. Existen tratamientos convencionales como las lagunas de oxidación que permiten la depuración de las aguas residuales. Estos tratamientos biológicos son eficientes en la remoción de muchos elementos contenidos, pero aún no son muy eficientes en la remoción de los parámetros bacteriológicos, pues su índice sigue siendo muy alto.

Actualmente, existen tecnologías capaces de enfrentar este problema. Entre las técnicas más empleadas para el tratamiento de aguas residuales se describen los procesos de oxidación avanzada. Estos procesos emplean la generación de radicales hidroxilo para la degradación de muchos contaminantes persistentes y que no se logran eliminar mediante tratamientos convencionales. Entre estos procesos está el proceso de fotocátalisis heterogénea, que son tratamientos que emplean la radiación solar sobre la superficie de un catalizador ( $\text{TiO}_2$ ) para generar reacciones de óxido-reducción y gracias a ello inhibir el crecimiento microbiano hasta reducirlo.

Así se inicia este trabajo de investigación, con el objetivo principal de determinar la influencia del proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales de las aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Jauja, y así poder analizar las muestras experimentales para lograr resolver el problema planteado en el primer capítulo, debido a que es importante plantear alternativas de solución ante el grave problema de contaminación de aguas, ligado a su grave escasez.

El segundo capítulo complementa el desarrollo de esta investigación. Las investigaciones que anteceden este trabajo y las bases teóricas dan sustento a la información contenida. El tercer capítulo comprende el desarrollo experimental que incluye los procedimientos realizados desde la toma de muestra del agua residual del efluente, el proceso fotocatalítico y el análisis en el laboratorio. El cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos después de realizar el proceso experimental y, por último, se presentan las conclusiones a las que se llegaron, las recomendaciones y los anexos de la investigación.

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

### 1.1. Planteamiento y formulación del problema

#### 1.1.1. Planteamiento del problema

El rápido crecimiento demográfico y el proceso acelerado de urbanización ha generado una importante dinámica territorial por los cambios de uso de tierra (1) y esto ha traído consigo un aumento descontrolado del uso de agua para satisfacer necesidades domésticas, industriales y agrícolas, derivando en una mayor contaminación de las aguas asociado a su grave escasez. Se estima que la población urbana podría casi llegar a duplicarse para el año 2050; por ello, es indispensable una transformación de la gestión de las aguas residuales para poder satisfacer las necesidades en el futuro. A nivel mundial, la falta de un adecuado sistema de gestión para el tratamiento de las aguas residuales constituye un grave problema pues estas aguas residuales están cargadas de materia orgánica, contaminantes químicos y microbiológicos que contaminan los cursos hídricos, amenazando la salud y el bienestar humano, y de los ecosistemas. (2)

En la población de América Latina, el uso y contaminación se viene incrementando. Más del 70% de las aguas residuales no tienen tratamiento, (3) y la escasez de este recurso hídrico ha traído consigo nuevas prácticas por parte de la población agrícola, pues, en la última década, vienen incorporando el uso de aguas recicladas para el riego de sus cultivos. Este tipo de práctica supone un grave riesgo al contener microorganismos patógenos. Por ello, es

necesario centrarse en el tratamiento de aguas residuales para una reutilización más técnica con criterios sanitarios. (4)

En el Perú, son pocos los proyectos para el tratamiento de aguas residuales, pues solo se ha ejecutado el 30 % de la inversión pública (5). Por otro lado, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y la gestión de recursos hídricos (Ley N° 29338) (6) han desarrollado la necesidad de alentar un enfoque al reaprovechamiento del agua en torno al sector agrario, ya que, aproximadamente, 40 m<sup>3</sup> de aguas residuales sin tratar se vierten a fuentes superficiales y unas 4000 hectáreas de cultivos se riegan con esta agua (4). Los efluentes líquidos debidamente tratados se pueden utilizar en diferentes actividades agrícolas y forestales, evitándose la contaminación de las fuentes superficiales, principalmente por sus efectos en la agricultura y la salud pública, reduciendo el riesgo de enfermedades infecciosas. (7)

Existe la necesidad de plantear nuevos métodos de tratamiento de aguas residuales, cumpliendo los parámetros de calidad para su reúso; sin embargo, la mayoría de los métodos de tratamiento convencionales no cumplen con los parámetros de calidad exigidos por la normativa para su reutilización. Estos métodos tradicionales de diseño se encuentran orientados, en su mayoría, a la degradación de materia orgánica y de sólidos, pero actualmente existe la necesidad de remover patógenos como los coliformes totales encontrados en el agua residual, siendo la finalidad del tratamiento lograr el reaprovechamiento de estas aguas. Esta necesidad de remover estos agentes patógenos va a depender de la tecnología empleada y la suficiencia de esta para conseguir los niveles deseados. (7)

La presencia de microorganismos patógenos como los coliformes totales, que contempla un grupo de bacterias gramnegativas, representados por la bacteria *Escherichia coli*, son causantes de muchas afecciones en la salud de las poblaciones, generando enfermedades gastrointestinales, siendo el causante de muchas muertes de niños, especialmente de la región Junín. (8)

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) representan una buena opción. Son empleadas para la disminución de la carga orgánica presente; sin embargo, a pesar de que algunas plantas de tratamiento incorporan tratamientos biológicos previos como la PTAR de Jauja, que cuenta con un sistema de tratamiento denominado lagunas de estabilización, puede

reducir efectivamente la concentración de los contaminantes presentes en las aguas residuales, pero estas aguas aún no se pueden disponer para el uso agrícola, debido a que no garantizan la calidad microbiológica, puesto que la carga bacteriana es muy elevada. Si bien se logra disminuir la concentración microbiológica, aún no es apta para su reutilización (4). Es posible mejorar la calidad del efluente del agua residual, empleando procesos de tratamiento complementarios y las tecnologías apropiadas, a fin de completar la degradación de patógenos y contaminantes persistentes y así presentar una mejor calidad de agua en el efluente.

En este sentido, los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) se describen como tratamientos efectivos para la remoción de un amplio número de contaminantes persistentes, incluidos aquellos microorganismos difíciles de depurar en sistemas convencionales a través de especies altamente oxidantes. En este campo, la fotocatalisis heterogénea ofrece ventajas sobre el tratamiento de diferentes contaminantes del agua residual, demostrando eficiencia en los procesos de degradación de contaminantes que influyen en la disminución de la calidad del agua, utilizando como semiconductor el  $\text{TiO}_2$ , pudiendo afectar en forma positiva a los procesos ya existentes en la PTAR de Jauja (9). En relación a lo expuesto, surge el siguiente problema:

#### 1.1.2. Formulación del problema

##### a) Problema general

¿Cómo influye el proceso de fotocatalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales del agua residual de la Planta de Tratamiento (PTAR) de Jauja?

##### b) Problemas específicos

- ¿Cómo los parámetros del proceso de fotocatalisis heterogénea condicionan la concentración de coliformes totales?
- ¿De qué manera el pH influye en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR de Jauja?

- ¿Cómo la concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$  influye en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR de Jauja?

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Determinar la influencia del proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales de las aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Jauja.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros del proceso de fotocátalisis heterogénea que condicionan la concentración de coliformes totales
- Determinar de qué manera el pH influirá en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR de Jauja
- Determinar cómo la concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$  influye en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR de Jauja

## 1.3. Justificación e importancia

### 1.3.1. Justificación teórica

Esta investigación contribuirá a un nuevo conocimiento que permita fundamentar futuras investigaciones para diferentes tratamientos de aguas residuales tanto urbanas como industriales. A la vez, servirá como antecedente para futuras investigaciones para la implementación de sistemas con procesos avanzados de oxidación que presenten condiciones similares.

### 1.3.2. Justificación práctica

El estudio experimental permitirá determinar proporciones entre concentración

de catalizador, pH y tiempo de exposición a la radiación solar, a fin de determinar cuáles deben de ser las condiciones de trabajo más apropiadas para un tratamiento con procesos fotocatalíticos de aguas residuales en nuestra región.

### 1.3.3. Justificación económica

Al requerir menor espacio de infraestructura en comparación a otros métodos, podría ser un tratamiento que requiera menor inversión financiera, además de que los componentes e insumos químicos como el catalizador ( $\text{TiO}_2$ ) se encuentran en el mercado a un bajo costo y poseen un tiempo de vida alto; además, el uso de una fuente de energía renovable e inagotable como la radiación solar para la fotocatalisis tiene grandes ventajas en cuanto a costos energéticos se refiere.

### 1.3.4. Importancia

El descontrolado uso del agua para las diferentes actividades nos lleva a proponer nuevas opciones de tratamiento para el reaprovechamiento de este vital recurso. La PTAR de Jauja presenta ventajas en la remoción de los contaminantes presentes en las aguas servidas, siempre y cuando se mantenga y opere correctamente, pero es ineficaz en la remoción total de aquellos microorganismos patógenos, difíciles de eliminar con procesos convencionales, como son los coliformes totales del agua que representan un indicativo para la calidad de agua. Ante este hecho, el tratamiento fotocatalítico es una nueva alternativa para mejorar la remoción de los contaminantes persistentes. Este proceso puede ser usado de manera individual o como complemento a un tratamiento existente como un tratamiento terciario. La fotocatalisis heterogénea es una tecnología capaz de oxidar una gran cantidad de contaminantes persistentes en el agua residual, puesto que este proceso requiere de radiación UV, la cual puede ser aportada por la luz solar y así tener ventajas frente a otros procesos que requieren de energía eléctrica (10). Además, al mismo tiempo, el proyecto tiene como objetivo mejorar el estado de la calidad del agua residual en el efluente para

su futuro reaprovechamiento en el sector agrícola, buscando el desarrollo sostenible del centro poblado. (11)

#### 1.4. Hipótesis y variables

##### 1.4.1. Hipótesis general

**Hi:** El proceso de fotocátalisis heterogénea influye significativamente en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR de Jauja.

**Ho:** El proceso de fotocátalisis heterogénea no influye significativamente en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR de Jauja.

##### 1.4.2. Hipótesis específicas

**1) Ho:** Los parámetros del proceso de fotocátalisis heterogénea no influyen en la concentración de coliformes totales.

**Hi:** Los parámetros del proceso de fotocátalisis heterogénea influyen en la concentración de coliformes totales.

**2) Ho:** El pH no influye en el proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR de Jauja.

**Hi:** El pH influye en el proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR de Jauja.

**3) Ho:** La concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$  no influye en el proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR de Jauja.

**Hi:** La concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$  influye en el proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR de Jauja.

##### 1.4.3. Variables

Variable independiente (x): **Fotocátalisis Heterogénea**

Variable dependiente (y): **Concentración de Coliformes Totales**

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de la investigación**

##### **2.1.1. Antecedentes nacionales**

En la tesis de Ingaruca (8), cuyo objetivo fue evaluar el tiempo de contacto que existe entre la bacteria *E. coli* y la concentración de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> para su inhibición de aguas residuales tratadas, en base a métodos experimentales, utilizó el medio de cultivo agar MacConkey para el recuento por placas de la bacteria; para medir el tamaño de nanopartículas usó la técnica de diámetro hidrodinámico, mediante la técnica de Dispersión de Luz Dinámica (DLS) y la Microscopía Electrónica de Barrido para la morfología. Este experimento fue desarrollado en el laboratorio de Nanotecnología de la Universidad Nacional del Centro del Perú. Obtuvo como resultado, durante 180 minutos de contacto entre las nanopartículas de TiO<sub>2</sub> y la bacteria *E. coli*, una esterilización rápida. Por otro lado, el tamaño de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> con 11.03 nm de diámetro y la concentración de 10 ppm tuvo un efecto inhibitorio muy fuerte sobre la bacteria. En base a estos resultados, se concluyó que la aplicación de nanotecnología con TiO<sub>2</sub> es un método efectivo para la desinfección del agua tratada respecto a las bacterias contenidas en su medio.

Muñoz y Palomino (12) realizaron un estudio para determinar la influencia de la concentración del TiO<sub>2</sub> y el tiempo de tratamiento en la disminución de DQO

por fotocatalisis heterogénea del agua residual del camal municipal de la provincia de Chupaca. Utilizaron como estrategia de investigación la experimentación; prepararon 24 L de aguas residuales sintéticas; se consideró para el tiempo de tratamiento 3, 4 y 5 horas; para el catalizador  $\text{TiO}_2$  concentraciones de 1, 1.5, y 2 mg/L; y para manipular el pH se usó ácido clorhídrico. Los módulos fotocatalíticos alimentados por el efluente se posicionaron en forma horizontal y fueron expuestos a la radiación solar. Para el análisis, se tomó muestras en el efluente y se obtuvo que la concentración óptima para el tratamiento fue de 1.52 mg/L de  $\text{TiO}_2$ ; respecto al tiempo de tratamiento, se logró un mayor porcentaje de degradación a 4 horas de tratamiento. El porcentaje de DQO presente en las aguas residuales del camal se redujo en un 86.75 %, concluyendo que la concentración del  $\text{TiO}_2$  y el tiempo de tratamiento influyen significativamente en la disminución de DQO.

El estudio de Huanca (13) fue analizar la fotocatalisis heterogénea y su influencia en el tratamiento de las aguas residuales de la UNCP, usando como catalizadores el  $\text{TiO}_2$  y el peróxido de hidrógeno a diferentes concentraciones. Para ello, realizó una experimentación en laboratorio cuyo proceso fue de la siguiente manera: llenó 20 L de agua residual en el foto-reactor, ajustó el pH y dosificó concentraciones de 0.5 g/L y 1,0 g/L de  $\text{TiO}_2$  y de peróxido de hidrógeno (1,0 y 1,5 g/L). Para el análisis de DQO, tomó muestras antes y después del tratamiento para determinar sus valores. Como resultado las mayores tasas de degradación de DQO en aguas residuales, se obtuvo a la concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y  $\text{TiO}_2$  de 1 g/L en ambos casos, el pH óptimo fue 6 y el tiempo de tratamiento de 4,4 horas. A estas condiciones, el mayor porcentaje de degradación alcanzado fue de 92,75%. Con estos resultados, concluyó que la fotocatalisis heterogénea influye de forma significativa en el tratamiento de las aguas residuales de la UNCP.

El objetivo del estudio de Soto (14) fue determinar la eficiencia de la fotocatalisis utilizando plata (Ag) para inactivar coliformes totales (CT) en agua de pozo. Para ello, se tomó una muestra de 30 L de agua de pozo del asentamiento humano Marquéz de la provincia del Callao, preparó los catalizadores  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$  más plata (Ag) y sin plata (Ag), se irradió con radiación UV-A por 60 y 120 min, se llevó a laboratorio para el análisis

correspondiente, utilizando a los CT como indicador microbiológico. Después del tratamiento, los resultados aplicados sin plata tuvieron una eficiencia del 45.4% en la inactivación de los CT en 60 min y del 59.6 % en 120 minutos. Y para el tratamiento usando los catalizadores más plata, la eficiencia de remoción de los CT fue de 72.6% en 60 minutos y 93.2 % en 120 minutos. Se concluyó que en 120 minutos ocurre una mayor inactivación de los CT y si se utiliza los catalizadores  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  más plata (Ag) la eficiencia es mayor para la inactivación de los coliformes totales encontrados en agua de pozo.

En el año 2017, Alegre Z. (15) realizó una investigación con el objetivo de determinar la influencia del tipo de fotocátalisis (homogénea o heterogénea) y el tiempo de degradación de la materia orgánica de las aguas residuales textiles. Con una metodología experimental, utilizó dos módulos de fotocátalisis para un volumen de 25 L de agua a tratar, el tiempo de tratamiento se consideró de 1, 2 y 3 horas; para la experimentación con la fotocátalisis homogénea, requirió 0,02 mg/L de sulfato ferroso heptahidratado ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ ) en forma de sal y 2 g/L de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Para el proceso de fotocátalisis heterogénea, se necesitó 0,25 mg/L de  $\text{TiO}_2$  y 1 g/L de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Como resultado, para el proceso de fotocátalisis homogénea, el porcentaje de remoción de materia orgánica fue de 83,47% y para la fotocátalisis heterogénea se obtuvo una remoción de 90,62%. En cuanto al tiempo óptimo para una mayor degradación de materia orgánica y color fue de 2,76 y 4,85 horas, y para la fotocátalisis heterogénea 3,18 y 4,85 horas. En base a los resultados, concluye que ambos tipos de tratamiento fotocatalítico tienen influencia significativa sobre el tratamiento de aguas residuales textiles.

### 2.1.2. Antecedentes internacionales

La investigación de Jaramillo y Pinzón (16) tuvo como objetivo evaluar la degradación de los colorantes naranja de metilo, rojo congo y azul de metileno, a través del proceso de fotocátalisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Los desechos químicos se obtuvieron de la práctica de colorantes del Laboratorio de Química II desarrollado en la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Se trataron los residuos a distintas concentraciones de  $\text{TiO}_2$  (500-

700-1000 ppm), peróxido de hidrógeno (300 ppm) y pH (3-4-5). Luego de realizar las pruebas prácticas, pasó por un reactor fotocatalítico de helio con tiempo de exposición a la luz solar de 1 y 2 horas. Las degradaciones alcanzadas fueron para naranja de metilo (64,9%) a una concentración de 700 ppm de  $\text{TiO}_2$ , 300 ppm  $\text{H}_2\text{O}_2$  y pH 3; rojo congo (85,7%) a 500 ppm de  $\text{TiO}_2$ , 300 ppm de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y pH 3; azul de metilo (91.9%) a 700 ppm de  $\text{TiO}_2$ , 300 ppm de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y pH 3. Lo que lleva a la conclusión de que la concentración óptima a la que se produce la degradación del contaminante es de 700 ppm de  $\text{TiO}_2$ , 300 ppm de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y el pH ideal para promover las degradaciones fue de 3, lo que puede demostrar que este tipo de tecnología resulta útil para la degradación de los colorantes obtenidos en laboratorio.

En la tesis de Casierra M. (17), se plantea el objetivo de evaluar procesos de oxidación avanzada (POA) acoplado con sistemas de tratamientos biológicos, para su reutilización. Este proyecto de investigación evaluó el potencial de desinfección del agua residual mediante la combinación de un proceso fotocatalítico usando peróxido de hidrógeno (UV solar /  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) y un sistema de humedales de flujo subsuperficial horizontal. Para llevar a cabo este estudio, construyó un fotorreactor a base de tubos de polimetilmetacrilato (PMMA) que fueron expuestos a radiación solar UV, operado en modo batch, con una dosis aplicada de peróxido de hidrógeno en 3, 30 y 300 mg/L. Luego se evaluó el efecto de la fotocatálisis. Los resultados mostraron un nivel de desinfección del 99.999% para los parámetros microbiológicos como los coliformes fecales y totales, con tres días de retención en el sistema biológico y cinco horas en el fotorreactor. Se concluyó que un sistema biológico acoplado con un PAO permitió una mejor calidad del agua. Esto permitiría el reúso de estas aguas en actividades como el riego de espacios verdes, siendo una estrategia eficaz para reducir los problemas de reutilización del agua.

La tesis doctoral de Jimenez M. (18) plantea la aplicación de un proceso de fotocatálisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$  inmovilizado en esferas de vidrio para el tratamiento de las aguas residuales de la industria alimentaria (Cítricos del Andarax), de la provincia de Almería (España) como tratamiento terciario, en la escala de una planta piloto en un reactor solar fotovoltaico tipo CPC. El objetivo propuesto fue evaluar la degradabilidad de los contaminantes

químicos persistentes a través de este tratamiento terciario. Los resultados logrados indicaron que el catalizador  $\text{TiO}_2$  inmovilizado en esferas de vidrio tiene actividad fotocatalítica y estabilidad mecánica después de 5 ciclos de reacción. Sin embargo, se observó que a medida que aumentaba la complejidad del agua a tratar, la eficiencia fotocatalítica disminuía. Así mismo, se pudo evidenciar la eliminación parcial de los contaminantes industriales hasta un 88 %. Por otro lado, al adicionar dosis de peróxido de hidrógeno (500 mg / L), la eliminación de dichos contaminantes llegó hasta un 100%. Finalmente, se concluye que la evaluación del efecto del tratamiento terciario por medio de la fotocatalisis solar con  $\text{TiO}_2$  inmovilizado sería una buena alternativa para la desinfección de aquellos contaminantes industriales y biológicos, ya que alcanzan un nivel de desinfección satisfactorio.

Rojas N. (10) realizó un estudio desarrollado en la Universidad Javeriana de Bogotá, en el que el objetivo principal del estudio fue evaluar tres tratamientos para aguas residuales para la inactivación de bacterias *E. coli*, los cuales consisten en el tratamiento con laguna facultativa, fotocatalisis con  $\text{TiO}_2$  y desinfección química con cloro. Para ello, en primer lugar, se realizó una caracterización del agua residual por métodos analíticos tanto físicos, químicos y microbiológicos para conocer su estado inicial. Luego, fueron tratadas con los tres métodos planteados. Como resultado, se obtuvo que el tratamiento con fotocatalisis con  $\text{TiO}_2$  fue significativamente mayor en comparación al tratamiento con laguna facultativa y tratamiento químico con cloro para la inactivación de las bacterias *E. coli*, pues a los 30 días de proceso del agua residual con tratamiento fotocatalítico con  $\text{TiO}_2/\text{UV}$  no presentó contaminación con *E. coli*. La principal conclusión de este estudio fue que el tratamiento de fotocatalisis con  $\text{TiO}_2$  fue un método efectivo para la eliminación de las bacterias *E. coli* en las aguas residuales domésticas y que pueden ser empleadas para el riego.

Vargas C. (19) en su proyecto de tesis cuyo objetivo fue aplicar el método de Oxidación Fotocatalítica para tratar derrames de aceite (hidrocarburos) en el agua con  $\text{TiO}_2$  y radiación UV, para propósitos de reúso y así evitar o minimizar los impactos negativos causados a los ecosistemas debido a vertidos de aceites en las aguas, ya que por su complejidad y toxicidad son de difícil

eliminación por procesos convencionales. Después de realizar una serie de ensayos químicos en laboratorio, se demostró que el uso de  $\text{TiO}_2$  y luz ultravioleta son eficaces en la degradación de hidrocarburos del agua contaminada con aceite de motor, pues se obtuvieron remociones de hidrocarburos superiores al 60% en 1 hora de exposición a la luz UV. Concluyó enfatizando que la fotocatalisis heterogénea usando  $\text{TiO}_2$  y luz UV permitió una cantidad significativa de hidrocarburos removidos en la muestra, inclusive al ser expuesto a los valores más bajos respecto a la dosis del catalizador y el tiempo de tratamiento que se analizaron. Finalmente, el autor recomienda este tipo de tecnología para tratar aguas contaminadas con hidrocarburos, ya que este es un contaminante de gran importancia ambiental.

## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Contaminación del agua

Según la OMS, el agua está contaminada cuando su composición se encuentra alterada y no reúne las condiciones necesarias para su uso. (3)

La contaminación del agua generalmente es provocada por actividades humanas propias de la vida cotidiana y, en mayor volumen, a través de la producción industrial, la agricultura, pesca, actividades recreativas, entre otras, volviéndola peligrosa para el consumo humano y para los ecosistemas. (4)

- Principales contaminantes del agua

En los cursos de agua, existe un proceso denominado autodepuración, generado gracias a los microorganismos descomponedores; sin embargo, si la cantidad del contaminante excede, la autodepuración no es posible. (11)

Los principales contaminantes del agua son los siguientes:

- Vertimiento de basuras y desmontes
- Vertimiento de desechos químicos de las fábricas incluyendo los pesticidas
- Vertimiento de relaves mineros y sustancias radioactivas
- Vertimiento de aguas residuales sin previo tratamiento. La mayor parte de las

zonas rurales y centros urbanos vierten sus aguas servidas directamente a los cursos hídricos como ríos, lagos o al mar. Estas aguas servidas transportan materia fecal, químicos, desechos industriales, hidrocarburos, entre otras sustancias, que resultan tóxicas para los ecosistemas acuáticos. Con el vertido de aguas residuales, sin tratamiento previo, es posible la propagación de patógenos como virus y bacterias.

Algunos de los contaminantes son de difícil depuración, por ello nace la necesidad de emplear nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, diferentes a los métodos de tratamientos convencionales. (19)

- Consumo sectorial de las aguas

En la actualidad, se consume 10 veces más agua de la que se tendría en 20 años, lo que significa una mayor contaminación (7). A consecuencia de este consumo, se genera, a su vez, una corriente de aguas residuales que son vertidas en las fuentes superficiales de agua. En la tabla 1, se muestra el consumo aproximado de agua para la agricultura, los municipios y la industria.

**Tabla 1.** Consumo y extracción a nivel mundial del agua

Uso	Consumo %	Efluentes %	Extracción total de recursos hídricos (%)
Agricultura	38	32	70
Municipal	3	8	11
Industria	3	16	19
Total (%)	44	56	100

Fuente: Datos de la FAO (2016)

En el Perú, los problemas relacionados con el agua son a causa del poco recurso económico destinado a proyectos de saneamiento y las deficientes infraestructuras de algunas plantas de tratamiento. Esta situación afecta la calidad y disponibilidad de este vital recurso; a razón de estos factores, existe un marco normativo que regula y fiscaliza todo uso previsto de este importante recurso. (20)

### 2.2.2. Marco normativo

- Normativa y fiscalización ambiental en el Perú

La normativa peruana considera aquellas directrices y principios para una correcta gestión ambiental. En los últimos años, en el Perú, se ha visto un incremento y una reestructuración de las regulaciones en materia de agua, regulando los vertimientos en algunos receptores; así mismo, la legislación del agua se encuentra enfocada en los objetivos y niveles mínimos esperados de calidad. (21)

- Límites máximos permisibles (LMP)

La calidad del efluente de las aguas residuales en las plantas de tratamiento deben cumplir con los Límites Máximos Permisibles contenidos en el D.S. N° 003-2010-MINAM. Los LMP miden la concentración de los elementos o sustancias y/o parámetros físicos, químicos y biológicos que se encuentran en los efluentes y si su concentración excesiva puede provocar daño a la salud de las personas, alterar su bienestar y la del ambiente. El organismo competente que supervisa el cumplimiento de los LMP es el OEFA, también facultado para aplicar sanciones en caso se excedan. (22)

**Tabla 2.** LMP para efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

Parámetro	Unidad	Valor
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	10 000
DBO	mg/L	100
DQO	mg/L	200
Ph	Unidad	6,5 – 8,5
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	150
Temperatura	°C	<35

Fuente: Ministerio del Ambiente - Decreto Supremo 003-2010

- Estándares nacionales de Calidad Ambiental (ECA)

Para el caso de vertido de los efluentes al cuerpo receptor más cercano, deben de cumplir con los ECA para agua - D.S. N° 004-2017-MINAM, que mide el grado de concentración de los elementos o sustancias y/o parámetros físicos, químicos y biológicos, que se encuentran en el agua, como cuerpo receptor, que no suponen un riesgo significativo para la salud humana o para el ambiente. (23). Para el posible uso agrícola del agua residual tratada, el ECA exige el cumplimiento de un máximo de 1 000 NMP/100 ml para bacterias E. coli y coliformes termotolerantes. (7)

**Tabla 3.** ECA Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales	D2. Bebida de animales	
		Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido	Bebida de animales
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1000	2000	1000
Escherichia coli	NMP/100 mL	1000	**1	**1

Fuente: Ministerio del Ambiente, Decreto Supremo 004-2017

En este contexto, la Ley de Recursos Hídricos N° 29338, que tiene como protagonista a la Autoridad Nacional del Agua (ANA), autoriza el vertido de aguas residuales tratadas con la aprobación de DIGESA, el Ministerio de Salud y la autoridad ambiental sectorial. Verifica el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental en los cuerpos de agua. También permite la reutilización de aguas residuales, previa autorización, confirmando que la salud humana y el normal desarrollo de la flora y fauna no se verán amenazados o se afectarán otros usos. (7)

### 2.2.3. Aguas residuales

Las aguas residuales, o también llamadas aguas servidas, son aquellas que, por influencia antropogénica, presentan un peligro y deben ser tratadas, ya que contienen gran cantidad de microorganismos patógenos y sustancias peligrosas para el ser humano y el medio ambiente. (4)

- Aguas residuales según su origen

Aguas residuales domésticas:

Son aguas residuales de origen residencial, que transportan desechos fisiológicos procedentes de inodoros (heces y orina humana), que contienen coliformes fecales, sólidos suspendidos y nitrógeno; y desechos de la higiene personal, de la limpieza del hogar y de la cocina, que contienen materia orgánica, grasas, sólidos suspendidos y microorganismos. (17)

Aguas residuales agrícolas:

Son procedentes de las labores agrícolas. Por su origen, estas aguas suelen unirse a las aguas urbanas que, en muchos lugares, se utilizan para el riego agrícola con o sin pretratamiento. (11)

Aguas residuales industriales:

Surgen del desarrollo de un proceso productivo realizado en fábricas e instalaciones industriales, incluidas las operaciones mineras que contienen ácidos, detergentes, aceites y grasas, subproductos de origen animal, vegetal o mineral. Su composición varía mucho en función de las diferentes actividades. (17)

Aguas residuales municipales:

También conocidas como aguas servidas, son aguas residuales domésticas que pueden mezclarse con aguas pluviales o aguas residuales industriales previamente tratadas, para ser acogidas a un sistema de alcantarillado combinado. (17)

- Parámetros de caracterización de las aguas residuales

- a) Parámetros físicos:

- Sólidos totales (ST): En su mayoría lo comprenden los sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos volátiles y sólidos disueltos totales.
- Temperatura: Tiene una influencia en los procesos de depuración química y biológica. También puede promover el crecimiento no deseado de ciertos tipos de hongos.
- Turbidez: Es causada por materia coloidal y partículas en suspensión que imposibilita el ingreso de la luz. (24)

- b) Parámetros químicos

- Materia orgánica: También conocida como carga orgánica, es una combinación de elementos como el carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno (CHON), para medir la concentración de materia orgánica en el agua residual. Se miden a través de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).  
Por otra parte, las proteínas son la principal fuente de nitrógeno, también se incluyen los carbohidratos, azúcares, dextrinas, almidones, celulosas, hemicelulosas, y otros componentes de menor proporción. (13)
- Aceites y grasas: Están compuestos por carbono, hidrógeno y oxígeno que se quedan flotando en la superficie de las aguas residuales, los cuales son difíciles de descomponer, causando problemas de mantenimiento, e impidiendo la actividad biológica. (13)
- Agentes tensoactivos: En las aguas residuales, son causantes de espumas.
- Nitrógeno y fósforo: Estos elementos son nutritivos y necesarios para el crecimiento biológico; sin embargo, una elevada concentración de nitratos da lugar al incremento de algunas algas y hongos, lo que no se desea en los tratamientos de agua.
- pH: El nivel de pH es importante porque, si se altera o el pH no es el adecuado, puede causar problemas en el tratamiento biológico. (13)

c) Parámetros biológicos:

Un indicativo de contaminación de las aguas residuales es la carga elevada de microorganismos como bacterias patógenas, virus entéricos, helmintos, protozoos y los coliformes totales (su número es proporcional al grado de contaminación fecal).

Las bacterias son importantes para la descomposición de la materia orgánica y su estabilización, pueden ser autótrofos o heterótrofos según su metabolismo; y según su necesidad de oxígeno se pueden dividir en aerobias, anaerobias o facultativas. El pH y la temperatura son factores importantes en la vida y muerte de las bacterias, ya que la mayoría de bacterias no toleran niveles de pH inferiores a 4 ni superiores a 9.5; el pH óptimo para el crecimiento y desarrollo de las bacterias está entre 6.5 y 7.5. Respecto a la temperatura, los microorganismos aumentan su velocidad de reacción a medida que la temperatura asciende, hasta alcanzar la temperatura límite. (4)

- Microorganismos indicadores

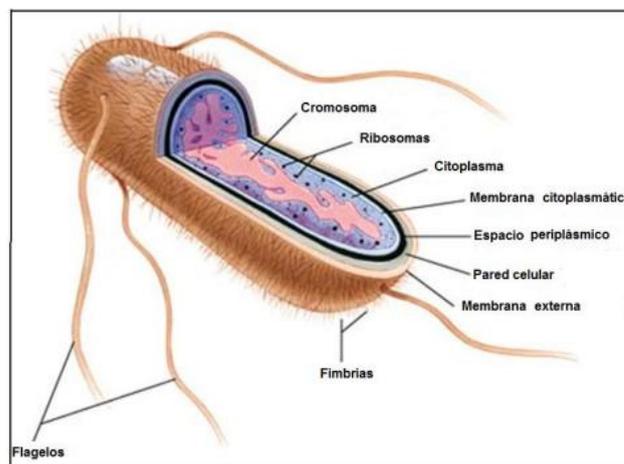
Coliformes totales

Son un grupo de microorganismos indicadores de contaminación fecal y patógenos. Comprenden todos los bacilos aerobios o anaerobios facultativos gramnegativos que no forman esporas, fermentan la lactosa a  $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  durante un periodo de tiempo de 48 h, produciendo ácido y gas ( $\text{CO}_2$ ). Su origen es principalmente fecal, se encuentran comúnmente en los intestinos de las personas y de animales de sangre caliente. Este grupo de bacterias está conformado principalmente por *Enterobacter*, *Escherichia*, *Citrobacter* y *Klebsiella*, pero la bacteria representativa en muchos casos para la evaluación de los coliformes totales es la bacteria *Escherichia coli*. De modo que, para acreditar que el agua es bacteriológicamente segura, es necesario indicar su ausencia. (25)

*Escherichia coli*:

*E. coli* es una bacteria anaerobia abundante en el microbiota intestinal. Son bacilos gramnegativos, su cubierta está compuesta por la membrana

externa y la membrana citoplasmática y, entre ellas, se encuentra el espacio periplásmico formado por péptidoglucanos, esta estructura le da a la bacteria su forma y rigidez, y gracias a ello puede tolerar presiones osmóticas relativamente altas, poseen metabolismo respiratorio y fermentativo, y su movilidad es por medio de flagelos. (26) Normalmente, crece a temperaturas entre 35 a 43°C, si la temperatura es inferior a 7°C su crecimiento puede inhibirse; de igual manera, a temperaturas superiores a 70°C se vuelven muy sensibles promoviendo su inocuidad. Otro parámetro que tiene un papel fundamental es el pH, valores entre 6 y 7.2 favorecen su desarrollo y crecimiento, y a valores de pH por debajo de 3.8 y por encima de 9.5 inhibe su crecimiento, evitando su proliferación. (8)



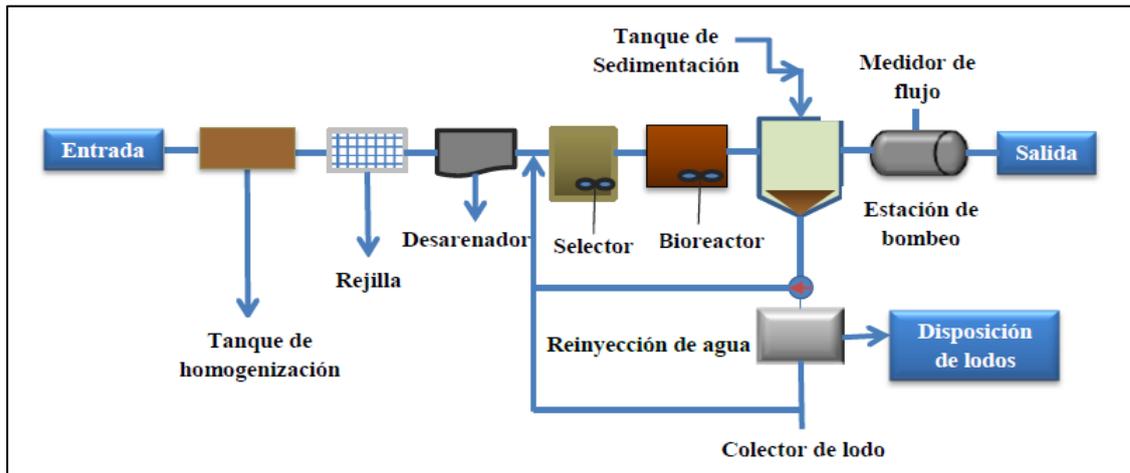
**Figura 1:** Componentes estructurales de un bacilo gramnegativo. E. coli

**Fuente:** Tomada de [www.canariculturacolor.com](http://www.canariculturacolor.com). (20)

#### 2.2.4. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales es el proceso de convertir las aguas residuales provenientes del uso doméstico, industrial o agrario, en un efluente final aceptable a las condiciones medio ambientales (24). Las aguas residuales deben ser tratadas para eliminar los contaminantes, ya sea por métodos fisicoquímicos o biológicos, y cumplan los parámetros establecidos por la normativa. (17)

Actualmente, existen muchos métodos de tratamientos según el tipo de agua a tratar y la calidad de agua que se espera.



**Figura 2:** Representación general del tratamiento básico de las aguas residuales

**Fuente:** Adaptado de Jimenez, M. (18)

- Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)

Las PTAR son instalaciones que consisten en un conjunto de procesos que hacen posible eliminar los contaminantes y depurar las aguas residuales para que puedan ser devueltas de forma segura a los cuerpos de agua más cercanos. (27)

- Etapas de tratamiento en una PTAR

Un proceso convencional de tratamiento de aguas residuales incluye los siguientes pasos:

- a) Etapa de pretratamiento

Su principal objetivo es retener y eliminar los sólidos grandes y gruesos, entre otros materiales como plásticos, telas, toallas sanitarias, madera, etc. Esta etapa incluye sistemas de rejillas, tamizadores, desarenadores y desengrasadores. (27)

- b) Etapa de tratamiento primario:

Esta etapa está diseñada para que, a través de procesos físicos de flotación y sedimentación, se realice la depuración de la materia orgánica

e inorgánica. Esta etapa permite eliminar hasta un 50 % de DBO, un 70 % de sólidos suspendidos y un 65% de aceites y grasas. (27)

Existen una variedad de tratamientos primarios, de los cuales podemos destacar:

- Decantación primaria: Este proceso consiste en la separación de los sólidos por gravedad. Su objetivo es la remoción de partículas que se puedan sedimentar. (18)
- Coagulación y floculación: Tratamiento físico-químico que sirve para retirar partículas coloidales y sólidos en suspensión.
- Tanque séptico: Es también conocido como fosa séptica. Es un tanque hermético hecho de concreto, PVC o plástico y fibra de vidrio, para contener y procesar aguas residuales generalmente domésticas con disposición final por infiltración.
- Tanque Imhoff: Son tecnologías de sedimentación primaria, cuyo objetivo es reducir entre el 25 al 35% de la DBO y remover del 40 al 50% de sólidos suspendidos (SST) para luego transferirlos a un tratamiento secundario. (18)

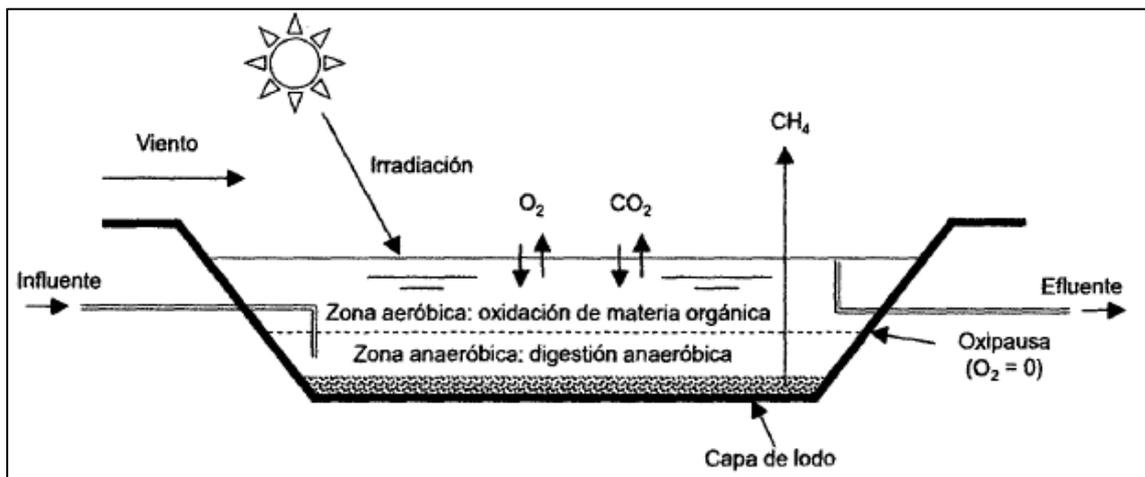
c) Etapa de tratamiento secundario

Básicamente, consiste en el empleo de procedimientos biológicos para descomponer la materia orgánica e inorgánica, suspendida y coloidal presente en las aguas residuales, convirtiéndola en sólidos sedimentables que se pueden dividir. Se encuentran los procesos aerobios y anaerobios. La eficiencia remocional de DBO de estos tratamientos biológicos oscila entre el 85% al 95%. (27)

Los procesos secundarios más empleados se muestran a continuación:

- Biodiscos: Los bioreactores de discos rotativos de contacto son un tratamiento biológico aerobio. La rotación de sus discos circulares permite la remoción de materia sólida a través de esfuerzos cortantes. (18)
- Filtros percoladores: Consisten en tratamientos aerobios, que cuentan con un relleno filtrante que puede estar compuesto por piedras. El agua residual es rociada sobre el filtro donde se adhieren los microorganismos y se da tratamiento a los contaminantes. (18)

- Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA): Su característica principal es el aprovechamiento de la digestión anaerobia. En el interior del reactor, ingresa el agua residual por la parte inferior y fluye de forma ascendente hasta llegar a un manto de lodos donde filtra y se da tratamiento a las aguas residuales. (18)
- Lodos Activados (LA): El nombre del proceso proviene de la producción aeróbica de una masa de microorganismos activados capaces de estabilizar los residuos. En una primera etapa, el proceso incluye un tanque de aireación (biorreactor), donde tiene lugar la asimilación y descomposición de la materia orgánica por parte de los microorganismos. En la segunda etapa tiene lugar el proceso de sedimentación de los lodos generados en la primera etapa. (18)
- Lagunas aireadas: Son reservorios donde las aguas residuales se tratan en un flujo continuo sin recircular los sólidos. Su principal función es la conversión de materia orgánica, mediante un aireador superficial o un difusor sumergido que aporte oxígeno. (18)
- Lagunas de estabilización (LDE): Denominadas lagunas de oxidación, son utilizadas como unidad principal de las PTAR en muchas provincias del Perú, a razón de los bajos costos de construcción y mantenimiento (27). Las LDE son tratamientos biológicos cuyo principal objetivo es la remoción de materia orgánica, sólidos en suspensión y microorganismos patógenos.



**Figura 3:** Esquema de una laguna de Estabilización Facultativa

**Fuente:** Seghezzo, 2016.

d) Tratamientos avanzados o terciarios:

El tratamiento terciario tiene como finalidad obtener un efluente de mayor calidad que el tratamiento secundario, eliminando los contaminantes que no se eliminaron en los procesos anteriores (27). Estos tratamientos pueden ser de carácter físico o químico, se suelen incluir procesos como ionización, cloración, procesos con membranas, electrodiálisis, Procesos de Oxidación Avanzada (POA), entre otros. (9)

### 2.2.5. Nuevas tecnologías aplicadas al tratamiento de aguas residuales

- Proceso de Oxidación Avanzada (POA)

Los POAs son tecnologías nuevas que se han descrito como eficaces en el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales, con el fin de destruir una amplia gama de contaminantes resistentes a procesos convencionales, a través de la aceleración de la oxidación no selectiva. A partir de procesos físico-químicos, son capaces de generar cambios en la estructura química del contaminante. Involucran la generación de radicales altamente oxidantes, especialmente el radical hidroxilo (OH) que son los de mayor implantación, ya que, después del flúor, este radical es el oxidante más energético. (19) Los radicales hidroxilos se pueden generar por medios fotoquímicos usando como fuente de energía lámparas UV o la luz solar. Algunos autores como Silva y Monge aseguran que, para acelerar el proceso oxidativo de estas, se pueden combinar con algunos agentes oxidantes como peróxido de hidrógeno, ozono, sales de hierro (Fe II y Fe III) y catalizadores como  $\text{TiO}_2$  (dióxido de titanio). (9) Estos elementos producen solo agua y dióxido de carbono como subproductos de la reacción. (11)

Debido a su alta efectividad oxidativa, es posible degradar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos, reduciendo aquellos contaminantes persistentes y de difícil depuración. Los Procesos de Oxidación Avanzada se pueden clasificar, según la participación de la luz, en procesos fotoquímicos y no fotoquímicos. (19)

**Tabla 4.** Procesos Oxidativos Avanzados más utilizados

Procesos no Fotoquímicos	Procesos Fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino ( $O_3 / OH^-$ )	Fotólisis del agua en el Ultravioleta de vacío
Ozonización con Peróxido de hidrógeno ( $O_3 / H_2O_2$ )	UV / $H_2O_2$ (Peróxido de Hidrógeno)
Procesos Fenton ( $Fe^{+2} / H_2O_2$ )	UV / $O_3$
Oxidación Electroquímica	FotoFenton
Radiólisis y tratamiento con haces de electrones	Fotocatálisis Solar
	Homogénea: Foto- Fenton y relacionados
	Heterogénea: Fotocatálisis con $TiO_2$

Fuente: Adaptado de Valero M. (28)

- **Procesos fotoquímicos**

Los procesos fotoquímicos se basan en la absorción de la luz en forma de radiación, principalmente de los rayos UV. Esta energía emitida activa una serie de reacciones en las moléculas generando estados electrónicamente excitados. Esta energía de activación puede ser suministrada por el Sol o por otra fuente. Estos procesos fotoquímicos se pueden combinar con la aplicación de peróxido de hidrógeno y ozono para acelerar su reacción y, en consecuencia, degradar los contaminantes presentes en las aguas residuales con la longitud de onda adecuada. (15)

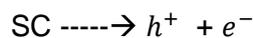
- **Fotocatálisis**

La fotocatálisis es una reacción fotoquímica que transforma la energía proveniente del Sol en energía química en la superficie de un catalizador (29). Es un proceso que emplea radiación UV (natural o inducida) y a través de un catalizador genera una reacción catalítica, dicho de otra manera, acelera una reacción fotoquímica. En la fotocatálisis, se tienen dos procesos: la fotocatálisis homogénea, en la que el sistema se usa en una sola fase (catalizador disuelto) y la fotocatálisis heterogénea, que utiliza como catalizador un semiconductor. El proceso de fotocatálisis es aplicable cuando el contaminante no es capaz de capturar fotones por sí mismo, entonces se hace imprescindible el uso de un catalizador que absorba la energía incidente y acelere la oxidación (30). Gracias a esta

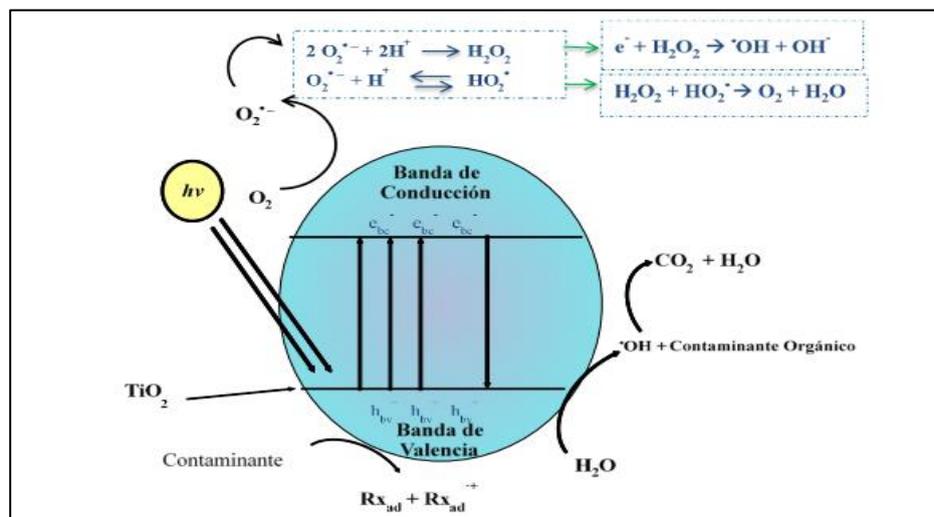
tecnología es que se generan los radicales hidroxilos que reaccionan con los contaminantes orgánicos en medios acuosos degradándolos a dióxido de carbono, agua y otras sales.

- **Fotocatálisis heterogénea**

La fotocatalisis heterogénea es una reacción fotoquímica que, a través de un semiconductor, el cual, al ser activado por la absorción de fotones, acelera el proceso de fotorreacción generando radicales hidroxilos a partir de reacciones óxido-reducción, que interaccionan con el contaminante (31). Cuando un fotón de energía igual o mayor a la energía del band gap (banda prohibida) del semiconductor incide sobre este, se produce una separación de cargas (pares hueco-electrón), provocando un salto de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, creando una brecha positiva en la banda de valencia, a este proceso se le denomina fotoexcitación. Los electrones en la banda de conducción interactúan con el oxígeno molecular formando el radical superóxido ( $^{\bullet}O_2$ ), ver ecuación (I). El hueco va a reaccionar con el  $H_2O$  disociándola y formando el radical hidroxilo (OH), ver ecuación (II), este radical se va a encargar de oxidar la materia orgánica, microorganismos y otros compuestos de difícil depuración hasta degradarla, produciéndose una mineralización completa de los contaminantes generando como subproductos el  $CO_2 + H_2O +$  Otros compuestos. (16)



Este proceso utiliza radiación UV cercana de espectro solar a 400 nm para activar un semiconductor, que en soluciones acuosas y con oxígeno disuelto genera el radical  $^{\bullet}OH$  como especie oxidante. (30)



**Figura 4:** Reacciones fotoquímicas durante el proceso de fotocatalisis heterogénea

Fuente: Jimenez M. (2016) (18)

- **Ventajas técnicas de la fotocatalisis heterogénea:**

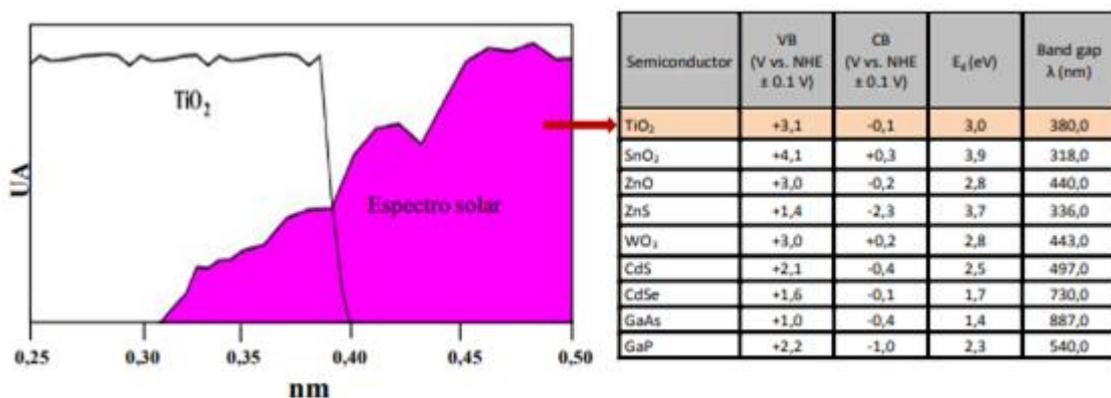
- La principal ventaja de la fotocatalisis heterogénea es su valor ambiental agregado, ya que la activación de fotones se puede lograr a través de la radiación solar o lámparas de baja potencia, reduciendo el consumo de energía eléctrica (11). Crea un método de tratamiento sostenible y amigable con el ambiente.
- Permite la degradación de contaminantes emergentes de difícil depuración y de microorganismos patógenos presentes en las aguas residuales, esto permite alcanzar un nivel de desinfección necesario para que los efluentes tratados sean reutilizados. (29)
- En comparación con otros procesos como la catálisis térmica, este proceso se produce en condiciones de operación a temperatura y presión atmosférica ambiente. (30)
- Este tratamiento es de tipo no selectivo, pues es posible tratar más de un contaminante a la vez y llevar a cabo simultáneamente procesos de desinfección; así mismo, se puede combinar con otros tratamientos para lograr una mayor eficiencia.
- Los semiconductores son los únicos reactivos o compuestos químicos que se necesitan para este proceso. (32)

- El dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>)

El dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) es un óxido metálico abundante. Es el semiconductor más utilizado en procesos de fotocatalisis heterogénea por su alto potencial fotocatalítico. Es de naturaleza no tóxica, pues es estable a corrosión fotoquímica; es química y biológicamente inerte, relativamente abundante y económico. (33)

Este compuesto químico es ampliamente usado para la conversión de energía solar a energía química a través de reacciones óxido-reducción que se llevan a cabo en la superficie, favoreciendo la degradación de los contaminantes presentes en las aguas residuales. (8)

El TiO<sub>2</sub> se puede activar usando luz solar ultravioleta, ya que tiene un ancho de banda prohibido de aproximadamente 3.2 eV. Para superar este gap de ancho de banda e inducir la fotoexcitación, par hueco electrón (e<sup>-</sup> y h<sup>+</sup>), es preciso incidir fotones del rango UV ( $\lambda \leq 400$  nm). Los fotones de luz UV son capaces de alcanzar esta energía; en cambio, la luz visible no puede proporcionar esta energía, por lo que es necesario usar lámparas de luz UV o la energía solar. A pesar de que la radiación solar tiene un efecto bactericida por sí sola, la presencia del TiO<sub>2</sub> con incidencia de radiación solar o con lámparas UV, acelera el proceso de desinfección de los contaminantes e inactiva los microorganismos más rápidamente. (30).

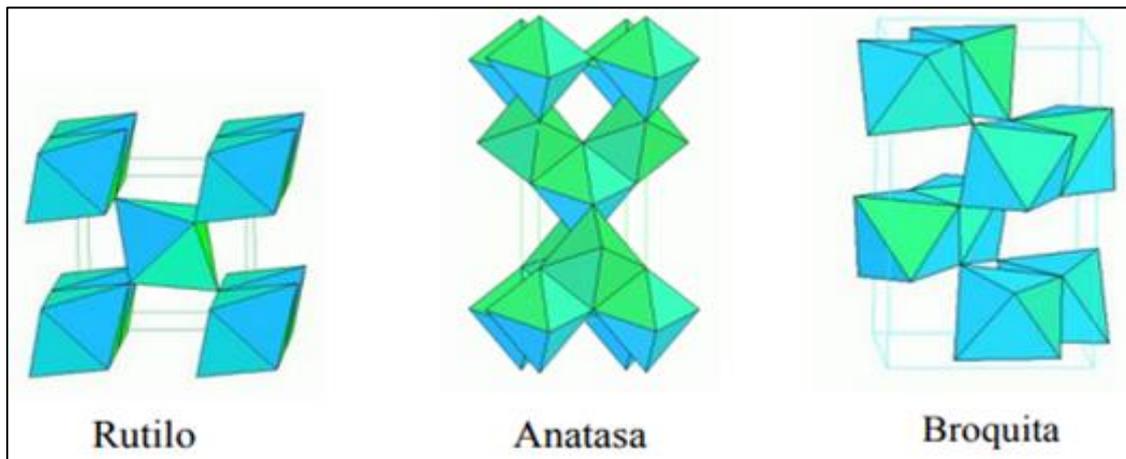


**Figura 5:** Espectro solar del TiO<sub>2</sub> en comparación con otros semiconductores

Fuente: Adpatado de Jimenez M. (18)

El TiO<sub>2</sub> se puede encontrar en tres formas cristalinas: rutilo, anatasa y brookita. Los tres poliformos pueden ser sintetizados. Los más usados por su alta efectividad en tratamiento de aguas residuales son rutilo y anatasa

(28), presentan mayor actividad fotocatalítica y promueven la separación del par  $e^-/h^+$ . (18)



**Figura 6:** Formas cristalinas del TiO<sub>2</sub>.

Fuente: Adaptado de Jimenez M. (18)

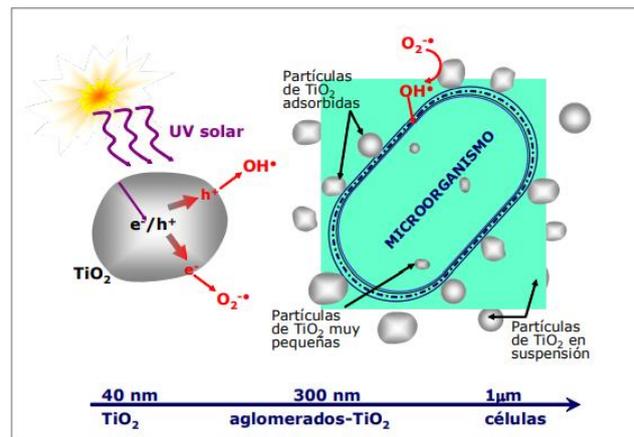
- **Acción bactericida de la fotocatalisis heterogénea con TiO<sub>2</sub>**

La desinfección fotocatalítica con TiO<sub>2</sub> ocurre cuando este semiconductor es activado mediante el proceso fotocatalítico por exposición a la radiación UV con longitudes de onda entre  $300 \text{ nm} > \lambda > 390 \text{ nm}$ , generando especies reactivas oxidantes, formando en la superficie del catalizador TiO<sub>2</sub> los huecos ( $h^+$ ) que reaccionan con los compuestos orgánicos presentes en la pared celular de los microorganismos para formar radicales libres, atacando sus componentes y/o alterando su funcionalidad, provocando daños mortales en diversos microorganismos, dando lugar a un tratamiento eficaz para la inactivación de microorganismos resistentes. (33)

Los daños ocasionados a los microorganismos también ocurren a nivel intracelular, principalmente en el citoplasma. Cuando el TiO<sub>2</sub> entra en contacto con los microorganismos, daña su sistema intracelular, las partículas de TiO<sub>2</sub> atraviesan la membrana plasmática e infieren en el citoplasma, donde suceden las reacciones biosintéticas y degradativas, alterando su funcionamiento y dañando sus componentes internos como el DNA, RNA, ribosomas, entre otros. (18)

Uno de los organismos más usados en los procesos de desinfección como indicador de calidad de agua libre de patógenos es la bacteria *Escherichia coli*, perteneciente al grupo de las bacterias gramnegativas. El mecanismo de inactivación de las bacterias *E. coli* se inicia por exposición solar. Esta acción provoca la interrupción o disminución de la síntesis de ATP y proteínas, lo que conduce a una reducción gradual del potencial de la membrana citoplasmática, provocando su permeabilidad y una disminución de la captación de glucosa, esto conduce a su inactivación.

(8)



**Figura 7:** Diagrama del proceso de fotocatalisis con  $\text{TiO}_2$  en microorganismos

Fuente: Adaptado de Fernandez, 2018

La eficiencia del tratamiento va a depender de algunos factores como el tiempo de irradiación, ya sea mediante la acción del Sol o el uso de lámparas, la concentración del catalizador y el tiempo de permanencia. El porcentaje de inhibición se mide por la reducción en las unidades formadoras de colonias (UFC). (16)

- Parámetros que influyen en la Fotocatalisis Heterogénea con  $\text{TiO}_2$

Hay una serie de parámetros que afectan al proceso fotocatalítico. A continuación, se describen los más importantes:

- Longitud de onda: Para la activación del  $\text{TiO}_2$ , es necesaria la exposición a la radiación con longitud de onda menor a 400 nm, correspondiente al espectro UV. Cuanto más corta sea la longitud de onda, más corta será la distancia de penetración de los fotones dentro de las partículas de  $\text{TiO}_2$  y

son absorbidos con más fuerza por las moléculas del semiconductor; por lo tanto, es mayor el aprovechamiento de la energía absorbida. (30)

- Catalizador: La literatura estudiada nos dice que cuanto mayor es la dosis del catalizador, más eficiente será el tratamiento, aunque este principio puede ser eficaz en el tratamiento, a la vez puede provocar un efecto de turbidez causado por la saturación de sus partículas, lo que dificulta la difusión de la luz UV. En cuanto a la disposición del catalizador  $\text{TiO}_2$ , este puede estar inmovilizado o en suspensión. (32)
- Temperatura y pH: La temperatura es un factor importante, pero en referencia con otras investigaciones, las reacciones fotocatalíticas no se ven afectadas por la variación de la temperatura. En cuanto al pH, es importante considerar este factor antes y después del tratamiento. Diferentes estudios han demostrado buenos resultados empleando  $\text{TiO}_2$  a diferentes valores de pH; sin embargo, es importante considerar el punto isoeléctrico para  $\text{TiO}_2$  que viene a ser pH 6.5, pues se ha comprobado que este afecta su respuesta catalítica en medios acuosos. (30)
- Calidad del agua a tratar: El agua residual comúnmente presenta materia orgánica e inorgánica, sólidos en suspensión y un alto grado de turbidez, lo que puede reducir la eficiencia de la oxidación fotocatalítica con  $\text{TiO}_2$ . (15)

### 2.3. Definición de términos básicos

- Bacterias: Son organismos unicelulares, ligeramente más largos que anchos, su tamaño promedio es de 1  $\mu\text{m}$ . A menudo viven en colonias de una misma especie entre miles o millones de individuos. (25)
- Bioconcentración: La bioconcentración corresponde a una sustancia específica que está más concentrada en el seno de un organismo que en su entorno. (34)
- Catalizador: Los catalizadores son sustancias capaces de acelerar una reacción química sin generar cambios en ella y, al finalizar la reacción, el catalizador se mantiene inalterado. El titanio, los óxidos de cobre y el níquel son los catalizadores más usados. (31)

- **Concentración:** Es la relación entre la cantidad del soluto y la cantidad de una disolución, donde la disolución es la sustancia que disuelve al soluto. Cuanto mayor sea la proporción del soluto disuelto en la disolución, más concentrada está la solución, y a menor proporción menos concentrada está. Cabe resaltar que una disolución es una mezcla homogénea, de dos o más sustancias, a nivel molecular. (32)
- **Contaminantes persistentes:** Son sustancias químicas o biológicas que persisten en el medio en que se encuentran. A este grupo de contaminantes pertenecen los compuestos de pesticidas, químicos industriales como dioxinas y furanos, y algunos microorganismos patógenos de difícil depuración. (29)
- **Degradación:** Es todo proceso a través del cual se modifica las propiedades de un elemento, implica una modificación en la composición química que puede incluso disminuirla. (29)
- **Efluente:** Son descargas del líquido residual que fluye de algún proceso industrial o alguna instalación. Generalmente, contienen contaminantes líquidos o desechos. (34)
- **E. Coli:** Es una bacteria común en el tracto intestinal del hombre y de otros animales de sangre caliente. Estos microorganismos presentes en el agua residual pueden derivar a una contaminación del cuerpo receptor, por ello su determinación es imprescindible cuando se analiza la calidad del agua tratada en una PTAR. (8)
- **Fotocatálisis heterogénea:** Es un proceso fotoxidativo que utiliza semiconductores sólidos; por ejemplo, ZnO, TiO<sub>2</sub>, etc., en forma de suspensión, para estimular una reacción en la interfase sólido/gas o sólido/líquido. (31)
- **Fotones:** Es la partícula elemental de la radiación electromagnética en todas sus formas, incluidos los rayos UV, rayos X, rayos gamma, la luz infrarroja, la luz visible, las microondas y las ondas de radio. (35)
- **Fotoxidación:** Es la modificación de las propiedades físico-químicas de una sustancia por la acción de la luz solar y del oxígeno (35)
- **Índice UV:** Indica la intensidad de radiación UV que proviene del Sol hacia la superficie de la Tierra en una escala que comienza en 0 y no se limita al pico. (14)

- Influencia: Consecuencia o efecto que produce una cosa sobre otra. (14)
- Oxidación: Es un proceso químico que se da en presencia de oxígeno, en el cual un átomo o molécula pierde electrones. (34)
- Oxidación fotocatalítica: Incluida en el grupo de los POAs (procesos de oxidación avanzada), estos procesos son muy estudiados debido a su efectividad en la remoción de diversos contaminantes mediante la generación de radicales hidroxilos altamente reactivos presentes en el agua o en el aire. (32)
- Patógenos: Medio o elemento que puede producir alguna enfermedad o algún tipo de daño a la salud humana, animal o vegetal. (25)
- Radiación solar: Es un fenómeno físico conformado por el conjunto de radiaciones electromagnéticas debido a la emisión energética del Sol. Esta radiación se puede cuantificar en una potencia reflejada por unidad de superficie y se expresa en unidades de irradiancia. Esta radiación llega a la superficie terrestre a una velocidad de  $3 \times 10^8$  a  $5 \times 10^8$  km/s, después de más de 8 minutos, y debido a que las ondas UV más cortas son absorbidas por los gases de la atmósfera solo llega un 51,6% a la superficie terrestre. (14)
- Radicales libres: Son átomos que tienen un electrón impar o desapareado en el orbital externo, lo que crea una gran inestabilidad. Estas moléculas inestables se oxidan para generar más radicales libres. (35)
- Radicales hidroxilo: Son moléculas reactivas formadas por un átomo de hidrógeno y otro de oxígeno. (35)
- Semiconductores: Material o elemento que, bajo ciertas condiciones, se comporta como conductor o aislante, va a depender de diversos factores, como por ejemplo el campo eléctricomagnético, la radiación incidente y la presión. (35)

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### 3.1. Método, tipo y alcance de la investigación

##### 3.1.1. Método de investigación

El enfoque es cuantitativo y se usó el método científico como método general, a partir de un conjunto de procedimientos que van a permitir explicar y generar conocimiento de las interrogantes planteadas en este estudio. Se entiende como método científico al conjunto de técnicas o procedimientos a través de los cuales se formulan problemas científicos y se prueban las hipótesis. (36) Durante el desarrollo de este estudio, se explica el fenómeno de ocurrencia del proceso de fotocátalisis heterogénea usando como catalizador el  $\text{TiO}_2$  frente a la concentración de grupo de especies bacterianas coliformes totales del agua residual de la PTAR de Jauja, considerando como variables la concentración del  $\text{TiO}_2$  y el pH. Es así que se buscó explicar los periodos o rangos de las variables para determinar su influencia sobre la concentración de coliformes totales y con ello poner a prueba las hipótesis planteadas en este estudio.

##### 3.1.2. Tipo de investigación

Por su finalidad, es de tipo aplicada, que implica el uso de los conocimientos que se adquieren para la resolución de los problemas planteados (37). Esta metodología permitió analizar y estudiar las variables de este estudio para dar

respuesta a los diversos cuestionamientos investigados, generando conocimiento con la aplicación directa del proceso fotocatalítico sobre la concentración de coliformes totales de agua residual de la PTAR Jauja.

### 3.1.3. Nivel o alcance de la investigación

El nivel es **correlacional – explicativo**, correlacional a razón de que en este estudio se midió el grado de asociación de las variables estudiadas, mediante el análisis correlacional Pearson, es explicativa porque nos dà una respuesta de por que el proceso de fotocátalisis heterogénea influye en la concentración final de coliformes fecales. (37)

Se entiende por investigación explicativa a aquellos estudios que pretenden establecer las causas de los hechos o fenómenos objeto de estudio. Con estos diseños, se puede explicar por qué ocurre, bajo qué condiciones se presenta, o por qué se correlacionan dos o más variables. (37)

### 3.2. Diseño de la investigación

Se utilizó un diseño **experimental**, debido a que, mediante el análisis en laboratorio desarrollado en las instalaciones de la Universidad Continental, en el año 2018, se evaluó la variable independiente frente a la variable dependiente, utilizando un método inductivo, considerando también para las pruebas de análisis los parámetros de estudio como pH y concentración del catalizador.

La estrategia utilizada involucró el uso del laboratorio de Biología Ambiental para someter las muestras tomadas del efluente de la PTAR de Jauja a un proceso de fotocátalisis heterogénea, utilizando un semiconductor que en este estudio se ha definido el TiO<sub>2</sub>, analizando los parámetros que afectan al proceso fotocatalítico como pH y la concentración del catalizador. En cuanto al tiempo de exposición a la radiación ultravioleta, se expuso por un lapso de 6 horas y a la temperatura, este parámetro se controló a un rango mínimo de 25°C y máximo de 40 °C con el fin de lograr óptimos resultados; por otro lado, se tomaron datos iniciales de coliformes totales, usando a la *Escherichia coli* como un organismo indicador de grupo de coliformes totales haciendo cultivos en cajas Petri. De esta manera, se analizó la correlación que existe entre el proceso de fotocátalisis heterogénea y su influencia en la concentración de coliformes totales de agua residual de la PTAR de Jauja para su posible aprovechamiento en la

agricultura de la zona. Para el análisis correlacional, se utilizaron métodos estadísticos como ANOVA y PEARSON.

**Tabla 5.** Diseño experimental

Pruebas	Nivel de PH	Concentración de TiO <sub>2</sub> (g/L)	Tiempo de exposición de la muestra a la radiación solar (horas)
$X_1$	6	0,03	6
$X_2$	6	0,04	6
$X_3$	6	0,05	6
$X_4$	6	0,06	6
$X_5$	7	0,03	6
$X_6$	7	0,04	6
$X_7$	7	0,05	6
$X_8$	7	0,06	6
$X_9$	8	0,03	6
$X_{10}$	8	0,04	6
$X_{11}$	8	0,05	6
$X_{12}$	8	0,06	6
$X_{13}$	9	0,03	6
$X_{14}$	9	0,04	6
$X_{15}$	9	0,05	6
$X_{16}$	9	0,06	6

Fuente: Elaboración propia

### 3.3. Población y muestra

#### 3.3.1. Población

La población está formada por todo el volumen de agua residual de la planta de tratamiento de aguas residuales de Jauja, que consiste en el caudal promedio de ingreso 35 L/s. (38)

#### 3.3.2. Muestra

Está constituida por una muestra de 20 litros de volumen, tomada del efluente de la planta de tratamiento de Jauja de acuerdo al "Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales", Resolución Ministerial N° 273- 2013-Vivienda. A

partir de este volumen, se realizaron 16 experimentos, debido a la interacción de los parámetros de estudio considerando los rangos para el proceso de fotocatalisis heterogénea, los cuales han sido sometidos a pruebas de laboratorio.

### 3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

#### 3.4.1. Materiales

- Tubos de vidrio de borosilicato de 1000 ml
- Probetas de 100 y 1000 ml
- Placas Petri
- Vaso de precipitado 25 ml
- Lunas de reloj
- Varilla
- Asa de siembra
- Mechero de Bunsen
- Mascarilla, guantes y guardapolvo

#### 3.4.2. Reactivo

- Dióxido de titanio
- Agar nutritivo
- NaOH (hidróxido de sodio)
- HCl (ácido clorhídrico)
- Agua destilada
- Indicador ferroína

#### 3.4.3. Equipos

- Ph metro digital marca HandyLab 600, con electrodo equipado
- Termómetro digital: marca Boeco, modelo TP101
- Balanza ordinaria de 2000 gr, marca Scout Pro
- Balanza analítica, marca Explorer
- Autoclave

#### 3.4.4. Instrumentos de recolección de datos

- Fichas de registros de campo
- Guías de observación de campo
- Cámara fotográfica

### 3.5. Técnicas de análisis y procesamiento de datos

#### 3.5.1. Técnicas de análisis

La metodología empleada para recolectar, conservar y preservar la muestra se realizó siguiendo el protocolo de muestreo según la Resolución Ministerial N° 273 – 2013 Vivienda del protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las PTAR doméstica o municipal.

#### 3.5.2. Procesamiento de datos

El análisis de prueba estadística para poner a prueba la hipótesis se realizó con el uso del factor de método estadístico ANOVA (análisis de varianza), el índice de correlación de Pearson y hojas de cálculo Microsoft Excel 2016 para el análisis y procesamiento de datos.

### 3.6. Diseño de la experimentación

#### 3.6.1. Ubicación geográfica y descripción de la PTAR de Jauja

La Planta de Tratamiento de Jauja está ubicada en el Distrito de Sausa, Provincia de Jauja - Junín, a una altura de 3360 msnm, cuyas coordenadas geográficas son 11°57'59"S (Sur), 75°18'49.8"W (Este). Ocupa una extensión de 21 Ha, en las cuales se da tratamiento a las aguas residuales generadas por aproximadamente 40 mil habitantes (38). Esta planta de tratamiento es administrada por la EPS MANTARO S.A.C. y actualmente está operativa.



**Figura 8.** Mapa de ubicación de la Planta de Tratamiento de Jauja

La PTAR de Jauja desarrolla el proceso biológico de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales, las cuales toman los caudales de los distritos de Sausa, Jauja y Yauyos. Cuenta con todos los procesos estandarizados conforme a la normativa peruana (38) y las directrices para el diseño según la norma técnica OS. 090.

La planta está conformada por un tratamiento previo que consiste en el uso de una cámara de rejillas, desarenador y caudalímetro Parshall; el tratamiento primario consta de dos lagunas en paralelo, estas reciben las aguas residuales con el objetivo de estabilizar la materia orgánica. En este proceso, se encuentran las plantas flotantes (planta nativa huana), como también las algas anaerobias que facilitan el oxígeno a los microorganismos para que puedan reducir la carga orgánica; en el tratamiento secundario, las aguas residuales descargadas entran a un proceso de estabilización natural o autodepuración mediante fenómenos físicos, químicos y biológicos con el objetivo de obtener un efluente apto para la descarga al cuerpo receptor que, en este caso, viene a ser el río Mantaro. La empresa Superconcreto del Perú S.A fue quien ejecutó esta PTAR con un presupuesto de S/. 5'785,854.30. A continuación, se presentan las características establecidas en el expediente técnico. (27)

**Tabla 6.** Características presentadas por la empresa "Superconcreto del Perú S.A de la PTAR de Jauja"

<b>Terreno:</b>	250,767.90 m <sup>2</sup> , 25.077 Ha
<b>Caudal promedio</b>	100 L/s
<b>Población servida</b>	37,355 habitantes
<b>Contribución</b>	34.5 gr DB05/hab/día
<b>Tasa de acumulación de lodo</b>	0.04 m <sup>3</sup> /hab/año
<b>Coliformes termotolerantes</b>	1,4x10 <sup>6</sup> NMP/100 mL
<b>Turbiedad</b>	3,29(UNT)
<b>Temperatura mas baja asumida para el diseño</b>	12 °C

Fuente: Adaptado del informe técnico de la empresa Superconcreto del Perú S.A., 2016

Para evaluar la eficiencia remocional, se determinaron las principales características de calidad de las aguas residuales, en comparación a la normativa respecto a los LMP regidos por el MINAM.

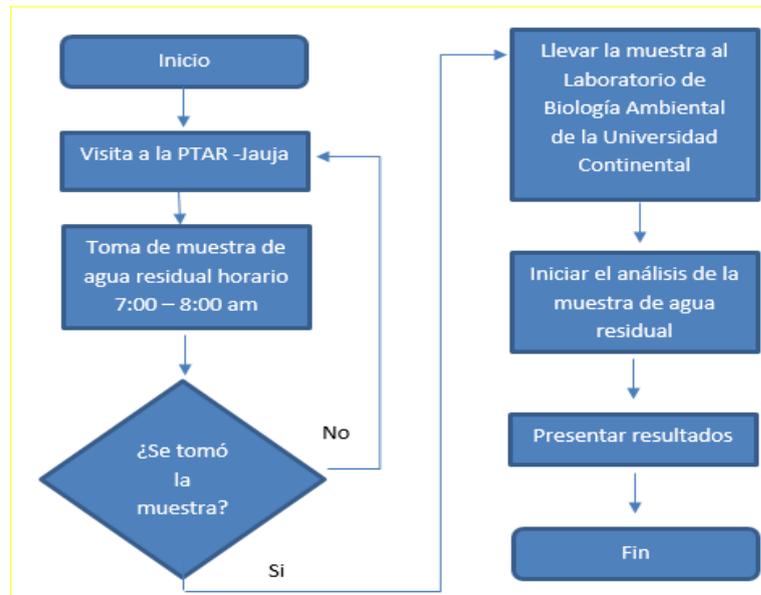
### 3.6.2. Metodología experimental

- Fuente de captación

Los experimentos se realizaron con muestras correspondientes al agua residual tomada del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Jauja.

- Se recolectó la muestra, siguiendo el Protocolo de Monitoreo RM-273-2013 - Vivienda para efluentes de las PTAR domésticas o municipales, desde la ubicación del punto de monitoreo, el muestreo, rotulado de las muestras, contemplado en los anexos del protocolo.
- La muestra del agua residual se tomó en el horario de la mañana, debido a que por horas de la mañana la carga orgánica es mayor. El horario de muestra fue a las 8:00 am del 04/07/2018.

- Se utilizó un recipiente de 20 L de capacidad para recolectar la muestra, se determinó los parámetros en campo y, una vez terminada, se realizó el rotulado y etiquetado de la muestra según el anexo IV del protocolo.
- Al finalizar la recolección de la muestra, esta se llevó al laboratorio de Biología Ambiental de la Universidad Continental para su respectivo análisis.



**Figura 9:** Diagrama de flujo del proceso de la toma de muestra

- **Parámetros que influyen en el proceso:**

- Concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$ : Con base a investigaciones similares, se determinó el intervalo de entre 0.03 g/L – 0.06 g/L para esta investigación.
- El pH: El  $\text{TiO}_2$  es un reactivo anfótero, por ello, puede funcionar adecuada y eficientemente a pH ácidos como básicos. Para este estudio, se evaluaron rangos de pH de 6-9. (17)
- El tiempo de exposición se dio por un periodo de 6 horas efectivas de 10 am a 4 pm. Esto hace que se aproveche la mayor cantidad de irradiación solar para la fotocatalisis heterogénea. En cuanto a la radiación solar, para la provincia de Jauja, oscila en un promedio de alrededor 5.13 - 5.63 kWh/ m<sup>2</sup>dia según el SENAMHI, y según los datos de la Estación Metereológica en el Valle del Mantaro tiene un valor promedio de 5.9 kWh/ m<sup>2</sup>dia llegando a 6 kWh/m<sup>2</sup>dia promedio anual.
- La temperatura se ha tomado como un valor controlado de acuerdo a lo especificado por Crispin R., en la que recomienda mantener un rango mínimo

de 15 °C y máximo 35°C, para garantizar una mayor eficiencia del proceso de fotocátalisis (39).

**Tabla 7.** Rangos usados para medir los parámetros

Parámetros	Rangos		
	Unidad de Medida	Mínimo	Máximo
pH	unidad	6	9
Concentración del TiO <sub>2</sub>	g/L	0.03	0.06
Tiempo de exposición a la radiación solar	Horas	6	6
Temperatura	(°C)	15	35

Fuente: Elaboración propia

### 3.6.3. Procedimiento experimental

Para cumplir con los objetivos planteados, es necesario seguir una serie de actividades por etapas, para así obtener los resultados esperados en la investigación.

- Caracterización inicial del agua residual de la PTAR Jauja

Se tomó como base la información de Beltran y Campos (38) para la caracterización de las aguas residuales tomadas del afluente y efluente de la PTAR de Jauja, que fueron analizados en el laboratorio de Química Ambiental de la Universidad Nacional del Centro del Perú, para así tener una descripción de las características iniciales del estado de la PTAR Jauja.

**Tabla 8.** Parámetros de medición a nivel del laboratorio

	Caudal	Ph	T°	DBO	DQO	SST	CTT
	L/s	Unid.	°C	mg/l	mg/l	mg/l	NMP/100 ml
Afluente	36.11	8.55	14.5	208.50	441	730	15 000 000
Efluente	33.18	9.02	16.6	107.50	236	461	126 000
<b>LMP, D.S N° 003-2010 MINAM</b>		<b>6.5-8.5</b>	<b>&lt;35</b>	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>150</b>	<b>10 000</b>

Fuente: Datos adaptados de Beltran y Campos, año 2016 (38)

Se observa que los valores de los parámetros son superiores a los establecidos en la normativa respecto a los Límites Máximos Permisibles; por lo tanto, se puede deducir que la PTAR de Jauja no cumple con la eficiencia remocional. En cuanto a los coliformes totales, superan hasta 10 veces más el nivel establecido por el MINAM, esto imposibilita el hecho de poder tener un reúso de estas aguas, ya sea en el sector agrícola o recreacional.

- Preparación del catalizador  $\text{TiO}_2$ 
  - Para las pruebas del proceso de fotocatalisis heterogénea, se utilizó tubos de vidrio de borosilicato (Pyrex) de 1000 mL de capacidad. Este tipo de material garantiza buena transmitancia e importante captura de rayos UV (a 254 nm).
  - Para cada prueba experimental, se tomó 1000 mL de volumen de la muestra, y se estabilizó el pH con NaOH (hidróxido de sodio) y HCl (ácido clorhídrico) para obtener rangos de 6, 7, 8 y 9.
  - Se preparó el catalizador de  $\text{TiO}_2$  a 0.03, 0.04, 0.05 y 0.06 g/L y se diluyó en la muestra de 1000 mL para luego ser sometido a la radiación solar durante un tiempo de 6 horas de 10 am a 16 pm, con el fin de aprovechar la mayor cantidad de radiación solar.
  
- Inoculación de Escherichia Coli usado como indicador de Coliformes Totales
  - Al finalizar el día, para la determinación de coliformes totales, se usó la bacteria E. coli como indicador. La evaluación se realizó mediante el método de recuento de placas, partiendo de la serie de diluciones decimales seriadas, mediante el empleo de técnicas en placas de agar.
  - Se tomaron 100 mL de cada muestra con dilución de 1/10 para realizar el análisis correspondiente.
  - Se preparó el cultivo y como medio se utilizó el agar nutritivo.
  - Se procede a inocular 1 ml del medio de cultivo en el agar nutritivo contenido en la caja Petri, previamente desinfectados con ácido sulfúrico al 20% para evitar la contaminación.
  - Una vez inoculado se coloca las placas Petri en autoclave a 150 °C durante 24 horas.

- Al cumplirse el periodo de incubación, se retiró del horno la placa Petri y se dejó enfriar.
- Se realizó el conteo de colonias y el registro de datos.
- De la misma forma, se repite el proceso para las diferentes concentraciones de TiO<sub>2</sub>.
- Las unidades formadoras de colonias se calculan mediante el número más probable (NMP/100 mL).

El cálculo del porcentaje de remoción se determina por la siguiente ecuación:

$$(\%)^{REMOCIÓN} = \frac{(C.inicial - C.final)}{C.inicial} \times 100$$

Donde: C representa la concentración del parámetro

- Interpretación de datos

A partir de los experimentos realizados, todos los datos experimentales obtenidos se analizaron usando el estadístico ANOVA,  $P < 0,05$ . Este análisis permite determinar para los resultados un nivel de confianza del 95 %.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### 4.1. Tratamiento de datos y análisis de la información

##### 4.1.1. Resultado de la influencia de los parámetros del proceso de fotocátalisis heterogénea que condicionan la concentración de coliformes totales

El análisis de los parámetros que influyen el proceso de fotocátalisis heterogénea se ha desarrollado para el pH en cuatro niveles 6,7,8 y 9; y cuatro niveles para la concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$  con valores de 0.03, 0.04, 0.05 y 0.06 g/L, con una exposición a la radiación solar de 6 horas.

Como valor inicial de Coliformes Totales se ha usado como indicador de este grupo a la bacteria *E. coli* mediante la metodología de recuento de placas, teniendo una concentración promedio inicial de 1620 NMP/100 ml presentes en el agua residual tratada de la PTAR de Jauja.

La concentración final de coliformes totales siguió la misma metodología de recuento de placas usando el medio de cultivo Agar MacConkey, llevado a la autoclave por 24 horas a una temperatura de 37 °C. Finalmente, se determinó el porcentaje de remoción usando la ecuación de unidades formadoras de colonias mediante el Número Más Probable (NMP/100 mL).

En la tabla 9, se muestra el resultado de la influencia de los parámetros del proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales,

con variación de los parámetros como pH y concentración de  $\text{TiO}_2$ , a una exposición de 6 horas para las muestras.

**Tabla 9.** Resultado de las muestras expuestas al proceso de fotocátalisis heterogénea

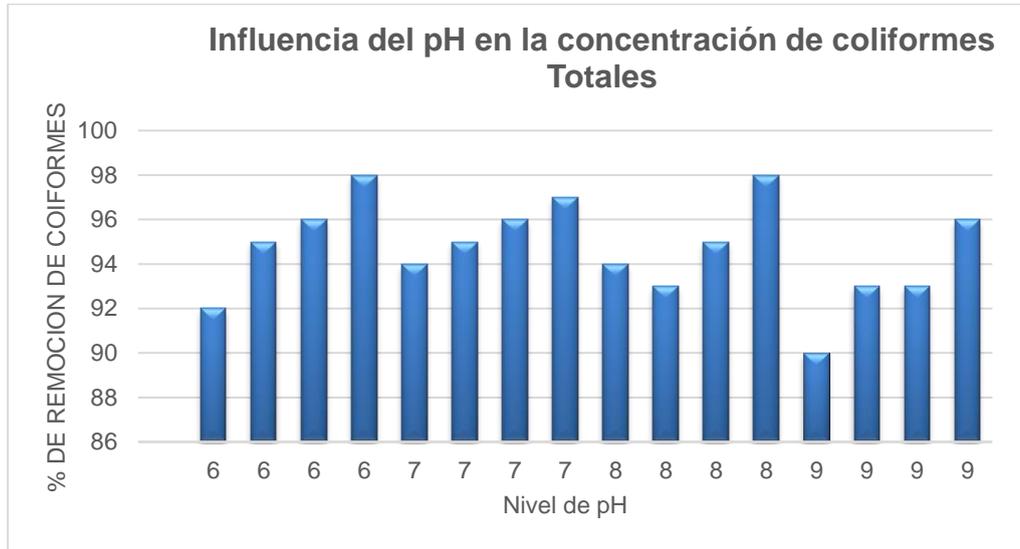
Nº Muestra	PH	Concentración de $\text{TiO}_2$ (g/L)	Coliformes Totales Iniciales (NMP/100 ml)	Tiempo de exposición de la muestra a la radiación solar (horas)	Coliformes Totales Finales (NMP/100 ml)	Porcentaje de remoción de coliformes
1	6	0,03	1620	6	123	92%
2	6	0,04	1620	6	79	95%
3	6	0,05	1620	6	70	96%
4	6	0,06	1620	6	29	98%
5	7	0,03	1620	6	90	94%
6	7	0,04	1620	6	84	95%
7	7	0,05	1620	6	68	96%
8	7	0,06	1620	6	51	97%
9	8	0,03	1620	6	101	94%
10	8	0,04	1620	6	110	93%
11	8	0,05	1620	6	79	95%
12	8	0,06	1620	6	33	98%
13	9	0,03	1620	6	165	90%
14	9	0,04	1620	6	115	93%
15	9	0,05	1620	6	110	93%
16	9	0,06	1620	6	61	96%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran el porcentaje de remoción de coliformes como consecuencia de la fotocátalisis heterogénea y los parámetros que condicionan su funcionamiento, el pH, la concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$  y la exposición a la radiación solar, obteniendo resultados favorables para este proceso. Se ha logrado reducir la concentración de los coliformes totales hasta 10 veces menos de la concentración inicial.

#### 4.1.2. Influencia del pH en la concentración de Coliformes Totales (CT)

El efecto de la influencia del pH sobre la concentración de coliformes totales se indica en la tabla 10, donde se presentan los resultados de la concentración de iones de hidrógeno en los microorganismos, después de un tiempo de exposición de la muestra de 6 horas.



**Gráfico 1.** Resultado de la influencia del pH en la concentración de Coliformes Totales

Después de realizar adecuadamente los procedimientos, se observa que se logra una mayor inhibición de crecimiento microbiano en los pH de 6, logrando tener un porcentaje de remoción de 98% en concentraciones de iones de hidrógeno, debido a que la bacteria *E. coli* crece y se multiplica a pH neutros (pH 7) al ser expuestos a agentes químicos como el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) detiene su crecimiento y al disminuir su pH (pH 6) empieza a tener una inhibición microbiana; por ello, se puede observar que a un pH 6 hay un mayor porcentaje de reducción de CT.

#### 4.1.3. Influencia de la concentración del catalizador $\text{TiO}_2$ en la concentración de Coliformes Totales del agua residual de la PTAR Jauja

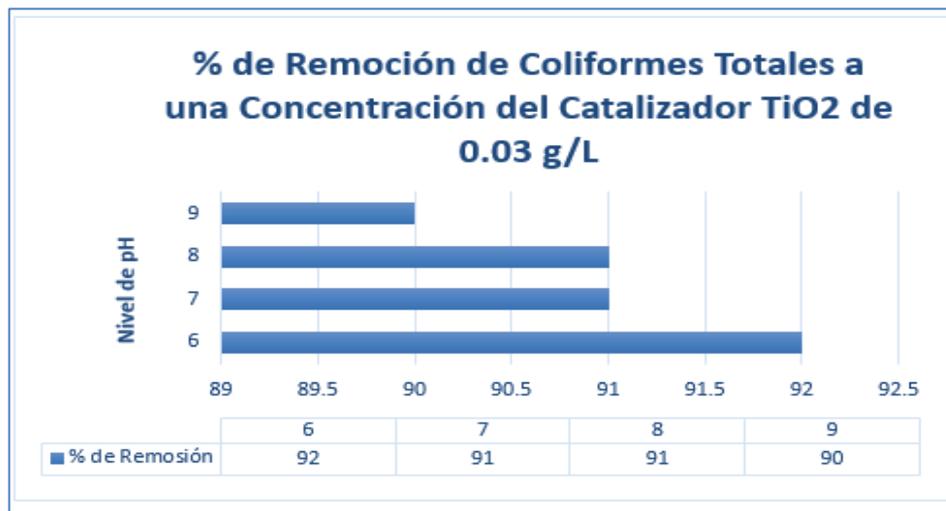
Para determinar el porcentaje de remoción de los CT, del agua residual de la PTAR Jauja, se evaluó a diferentes concentraciones del catalizador de  $\text{TiO}_2$ , a 0.03, 0.04, 0.05 y 0.06 g/L.

➤ Concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$  de 0.03 g/L

**Tabla 10.** Resumen del porcentaje de remoción a una concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$  de 0.03 g/L.

Nº Muestra	PH	Concentración de $\text{TiO}_2$ (g/L)	Coliformes Totales Iniciales (NMP/100 ml)	Tiempo de exposición de la muestra a la radiación solar (horas)	Coliformes Totales Finales (NMP/100 ml)	Porcentaje de remoción de coliformes
1	6	0,03	1620	6	123	92%
5	7	0,03	1620	6	131	91%
9	8	0,03	1620	6	142	91%
13	9	0,03	1620	6	155	90%

Fuente: Adaptado de los datos obtenidos en Laboratorio la Universidad Continental, 2018



**Gráfico 2.** Porcentaje de remoción de CT en 0.03 g/L de  $\text{TiO}_2$

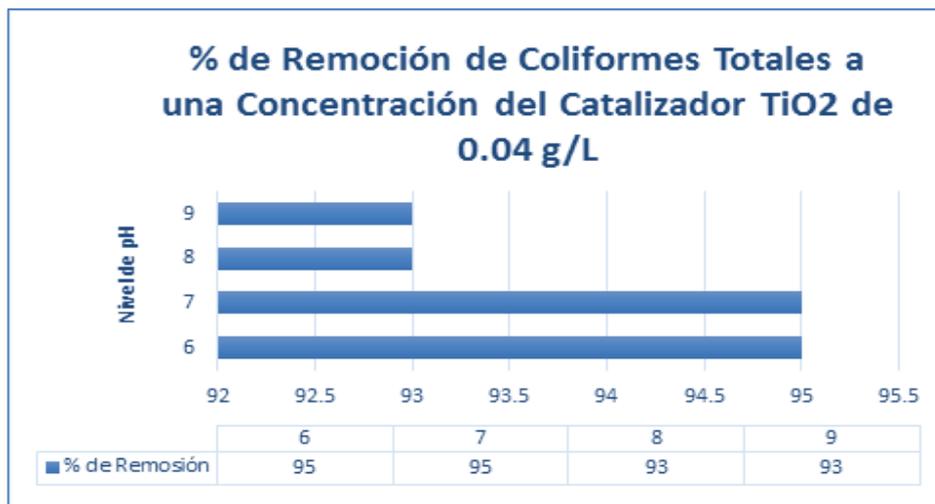
Los resultados de la tabla 10 presentan que para una concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$  a una concentración de 0.03 g/L, el porcentaje de mayor remoción es para un pH 6 con un valor de 92 % a diferencia de los valores de pH 7 y 8 que presentan un porcentaje menor de remoción del 91 %, mientras que para un pH 9 presentan un porcentaje de remoción de 90%.

➤ Concentración del catalizador TiO<sub>2</sub> de 0.04 g/L

**Tabla 11.** Resumen del porcentaje de remoción a una concentración del catalizador TiO<sub>2</sub> de 0.04 g/L.

Nº Muestra	PH	Concentración de TiO <sub>2</sub> (g/L)	Coliformes Totales Iniciales (NMP/100 ml)	Tiempo de exposición de la muestra a la radiación solar (horas)	Coliformes Totales Finales (NMP/100 ml)	Porcentaje de remoción de coliformes
2	6	0,04	1620	6	79	95%
6	7	0,04	1620	6	84	95%
10	8	0,04	1620	6	110	93%
14	9	0,04	1620	6	115	93%

Fuente: Datos obtenidos del Laboratorio de la Universidad Continental, 2018



**Gráfico 3.** Porcentaje de remoción de CT en 0.04 g/L de TiO<sub>2</sub>

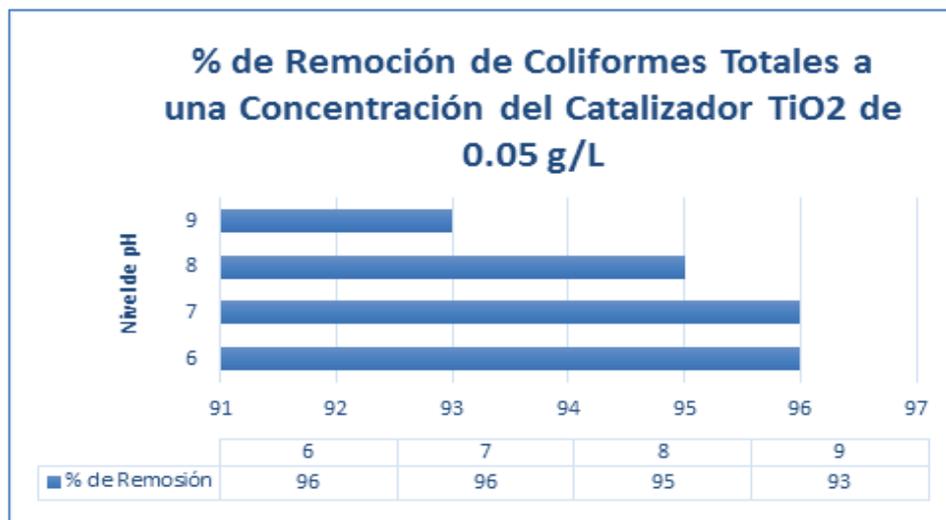
Los resultados de la tabla 11 presentan que para una concentración del catalizador de TiO<sub>2</sub> de 0.04 g/1000 ml, para un pH 6 y 7 presentan un porcentaje de remoción del 95 %, mientras que para un pH de 8 y 9 presentan un porcentaje de remoción del 93 %.

➤ Concentración del catalizador TiO<sub>2</sub> de 0.05 g/L

**Tabla 12.** Resumen del porcentaje de remoción a una concentración de catalizador TiO<sub>2</sub> de 0.05 g/L

Nº Muestra	PH	Concentración de TiO <sub>2</sub> (g/L)	Coliformes Totales Iniciales (NMP/100 ml)	Tiempo de exposición de la muestra a la radiación solar (horas)	Coliformes Totales Finales (NMP/100 ml)	Porcentaje de remosion de coliformes
3	6	0,05	1620	6	70	96%
7	7	0,05	1620	6	68	96%
11	8	0,05	1620	6	79	95%
15	9	0,05	1620	6	110	93%

Fuente: Datos obtenidos del Laboratorio de la Universidad Continental, 2018.



**Gráfico 4.** Porcentaje de remoción de CT en 0.05 g/L de TiO<sub>2</sub>

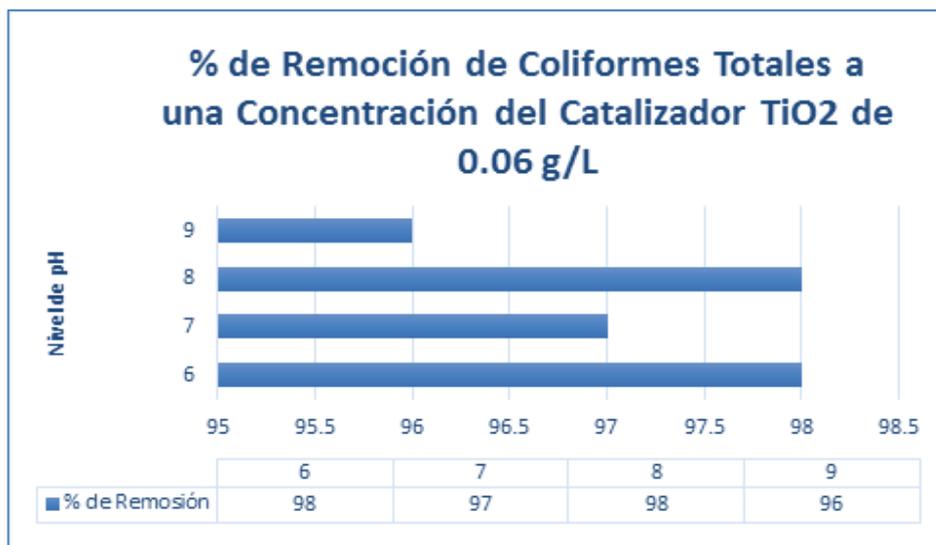
Los resultados de la tabla 12 presentan que para una concentración del catalizador de TiO<sub>2</sub> de 0.05 g/L, la remoción de CT aumenta, para un pH 6 y 7 presentan un porcentaje de remoción del 96 %, mientras que para un pH de 8 presentan un porcentaje de remoción de 95% y una menor remoción de 93 % para pH 9.

➤ Concentración del catalizador TiO<sub>2</sub> de 0.06 g/L

**Tabla 13.** Resumen del porcentaje de remoción a una concentración de catalizador TiO<sub>2</sub> de 0.06 g/L

Nº Muestra	PH	Concentración de TiO <sub>2</sub> (g/L)	Coliformes Totales Iniciales (NMP/100 ml)	Tiempo de exposición de la muestra a la radiación solar (horas)	Coliformes Totales Finales (NMP/100 ml)	Porcentaje de remoción de coliformes
4	6	0,06	1620	6	29	98%
8	7	0,06	1620	6	51	97%
12	8	0,06	1620	6	33	98%
16	9	0,06	1620	6	61	96%

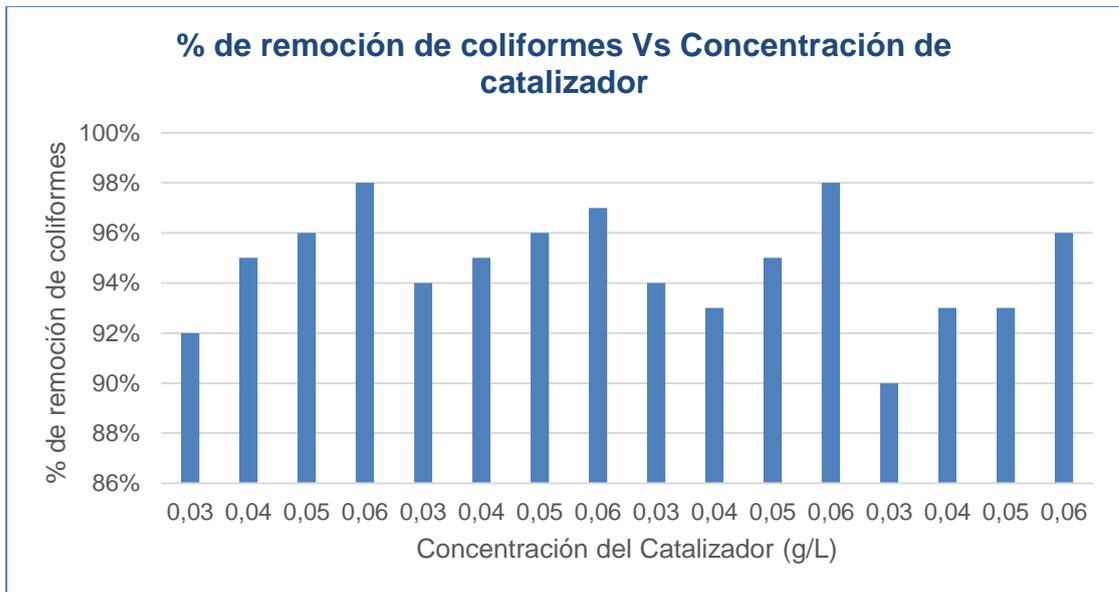
Fuente: Datos obtenidos del Laboratorio de la Universidad Continental, 2018.



**Gráfico 5.** Porcentaje de remoción de CT en 0.05 g/L de TiO<sub>2</sub>.

Los resultados de la tabla 13 presentan que para una concentración del catalizador de TiO<sub>2</sub> de 0.06 g/L, para un pH 6 y 8 presentan un mayor porcentaje de remoción de CT del 98 %, mientras que para un pH de 7 y 9 presentan un porcentaje de remoción de 97 y 96 % respectivamente.

Por lo tanto, el análisis del porcentaje de remoción de CT versus la concentración del catalizador, en resumen, se presenta en el siguiente gráfico.



**Gráfico 6.** Porcentaje de remoción de coliformes vs concentración del catalizador

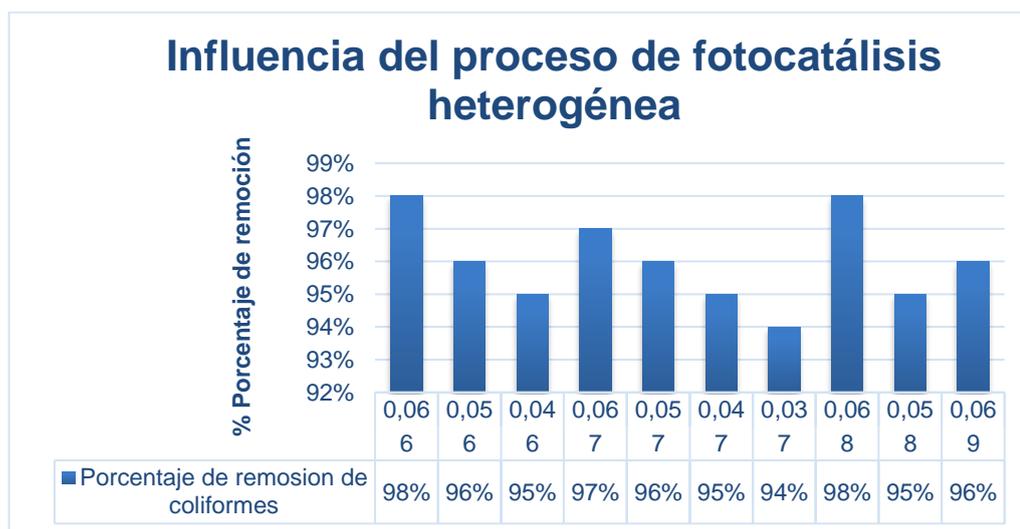
En síntesis, se puede observar que la concentración de 0.06 g/L presenta una mayor remoción de CT, mientras que la concentración de 0.03 g/L presenta un menor porcentaje de remoción de coliformes.

#### 4.1.4. Influencia del proceso de Fotocatálisis Heterogénea en la concentración de Coliformes Totales de las aguas residuales de la PTAR Jauja.

Para poder realizar el análisis del proceso de fotocatalisis heterogénea en la concentración de CT de las aguas residuales de la PTAR de Jauja, seleccionaremos de los resultados anteriores los valores de pH y concentración del catalizador con los cuales se obtuvieron los mejores resultados en la reducción de Coliformes Totales en las muestras evaluadas, considerando las 10 muestras más representativas y con valores menores a 100 NMP/100 ml.

**Tabla 14:** Valores obtenidos de Coliformes Totales Finales menores a 100 NMP/100 ml

Nº Muestra Mas representativas	Nº Muestra	PH	Concentracion (g/L)	Coliformes Totales (NMP/100 ml)	Tiempo de exposicion de la muestra (horas)	Coliformes Totales Finales (NMP/100 ml)	Porcentaje de remosi3n de coliformes
1	4	6	0,06	1620	6	29	98%
2	12	8	0,06	1620	6	33	98%
3	8	7	0,06	1620	6	51	97%
4	16	9	0,06	1620	6	61	96%
5	7	7	0,05	1620	6	68	96%
6	3	6	0,05	1620	6	70	96%
7	11	8	0,05	1620	6	79	95%
8	2	6	0,04	1620	6	79	95%
9	6	7	0,04	1620	6	84	95%
10	5	7	0,03	1620	6	90	94%



**Gráfico 7.** Influencia de la fotocátalisis heterogénea en la concentraci3n de CT

De los resultados podemos observar que las concentraciones de Coliformes Totales Finales más bajas se obtuvieron a una concentraci3n de catalizador de **0.06 g/L**. Con respecto al pH, se puede apreciar que el pH con mayor frecuencia es el **pH = 6 y 7**.

#### 4.2. Prueba de hip3tesis

##### 4.2.1. Influencia del pH en la Concentraci3n de Coliformes Totales

La determinación de la influencia del pH en la concentración de Coliformes Totales se realizó mediante el estadístico de análisis de varianza ANOVA.

- Análisis de varianza utilizando ANOVA

Se realizó la prueba de hipótesis para la determinación de la influencia del pH en la concentración de coliformes totales.

**Ho  $\mu = 0$ :** El pH no influye en el proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR Jauja.

**Ha  $\mu \neq 0$ :** El pH influye significativamente en el proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR Jauja.

Utilizando la prueba estadística de ANOVA se obtienen los siguientes resultados.

- Análisis de varianza de un factor entre el pH y los Coliformes Totales en la muestra

#### Resumen

Grupos	Cuenta	Promedio	Varianza
PH	16	7,5	1,33333333
Coliformes Totales Finales (NMP/100 ml)	16	85,5	1228,66667

#### Análisis de varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	48672	1	48672	79,1414634	6,47912E-10	4,170876786
Dentro de los grupos	18450	30	615			
Total	67122	31				

Ya que el valor de F en la muestra supera ampliamente el valor de F crítico de 4.17, se rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, para un nivel de confianza del 95 % se puede afirmar que el pH influye significativamente en el proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR Jauja.

4.2.2. Influencia de la concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$  en la concentración de Coliformes Totales de las aguas residuales de la PTAR Jauja

La determinación de la influencia de la concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$  en la concentración de Coliformes Totales se realizó mediante el estadístico de análisis de varianza ANOVA.

- Análisis de varianza utilizando ANOVA

Se realizó la prueba de hipótesis para determinar la influencia de la concentración del  $\text{TiO}_2$  en la concentración final de coliformes totales.

**$H_0 \mu = 0$ :** La concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$  no influye en el proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR Jauja.

**$H_a \mu \neq 0$ :** La concentración del catalizador  $\text{TiO}_2$  influye en el proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR Jauja

Utilizando la prueba estadística de ANOVA se obtienen los siguientes resultados para la muestra.

- Análisis de varianza de un factor entre la concentración del  $\text{TiO}_2$  y los Coliformes Totales en la muestra.

Resumen

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Concentracion (g/1000 ml)	16	0,72	0,045	0,000133333
Coliformes Totales Finales (NMP/100 ml)	16	1368	85,5	1228,666667

Análisis de varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	58420,4562	1	58420,4562	95,09568615	8,19027E-11	4,170876786
Dentro de los grupos	18430,002	30	614,3334			
Total	76850,4582	31				

Ya que el valor de F en la muestra supera ampliamente el valor de 4.17, se rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, para un nivel de confianza del 95 %, se puede afirmar que la concentración del catalizador  $TiO_2$  influye en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR Jauja.

Por lo tanto, podemos afirmar que existe una relación significativa entre la concentración del catalizador  $TiO_2$  y el proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración final de coliformes totales.

#### 4.2.3. Análisis del proceso de Fotocatálisis Heterogénea y su influencia en la concentración de Coliformes Totales del agua residual de la PTAR Jauja

El análisis de varianza para determinar la influencia del proceso de fotocátalisis en la concentración de CT se realizó mediante el programa Minitab.

Se realizó la prueba de hipótesis para determinar la influencia de la concentración del  $TiO_2$  en la concentración final de coliformes totales.

**$H_0 \mu = 0$ :** El proceso de fotocátalisis heterogénea no influye significativamente en la concentración de coliformes totales de agua residual de la PTAR Jauja.

**$H_a \mu \neq 0$ :** El proceso de fotocátalisis heterogénea influye significativamente en la concentración de coliformes totales de agua residual de la PTAR Jauja.

- Información del factor Porcentaje de Remoción vs. PH y Concentración

Factor	Niveles	Valores
pH	4	6, 7, 8, 9
Concentración CT	4	0.03, 0.04, 0.05, 0.06

**Tabla 17.** Valor de la significancia

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	0.006337	0.001056	11.79	0.001
Lineal	6	0.006337	0.001056	11.79	0.001
PH	3	0.001569	0.000523	5.84	0.017
Concentracion	3	0.004769	0.001590	17.74	0.000
Error	9	0.000806	0.000090		
Total	15	0.007144			

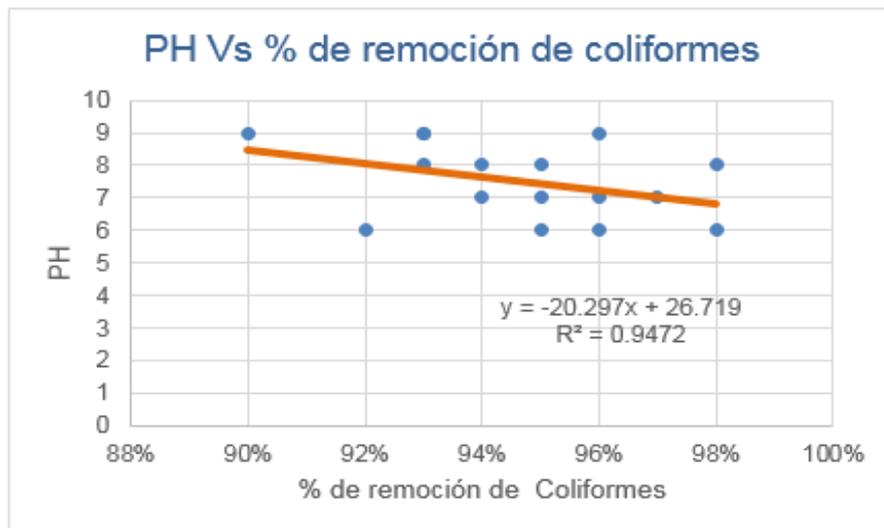
**Tabla 18.** Ecuación para la obtención del porcentaje de remoción

Ecuación para la Obtención del Porcentaje de Remoción
Porcentaje de Remoción = $0.94687 + 0.00562 \text{ PH}_6 + 0.00812 \text{ PH}_7 + 0.00312 \text{ PH}_8 - 0.01687 \text{ PH}_9$ $- 0.02188 \text{ Concentracion}_{0.03} - 0.00687 \text{ Concentracion}_{0.04}$ $+ 0.00312 \text{ Concentracion}_{0.05} + 0.02563 \text{ Concentracion}_{0.06}$

El análisis de varianza ANOVA nos indica que, como P, tanto de pH como la concentración de CT, es menor a  $\alpha = 0.05$  existe diferencia entre las varianzas de los datos comparados. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Por ello, se puede afirmar que el proceso de fotocátalisis heterogénea responde significativamente con respecto al porcentaje de remoción de CT. Por lo tanto, el proceso de fotocátalisis heterogénea influye significativamente en la concentración de coliformes totales del agua residual de la PTAR de Jauja.

- Análisis de Correlación de Pearson

Cuadro 01: Curva de regresión lineal del pH vs % de remoción de coliformes

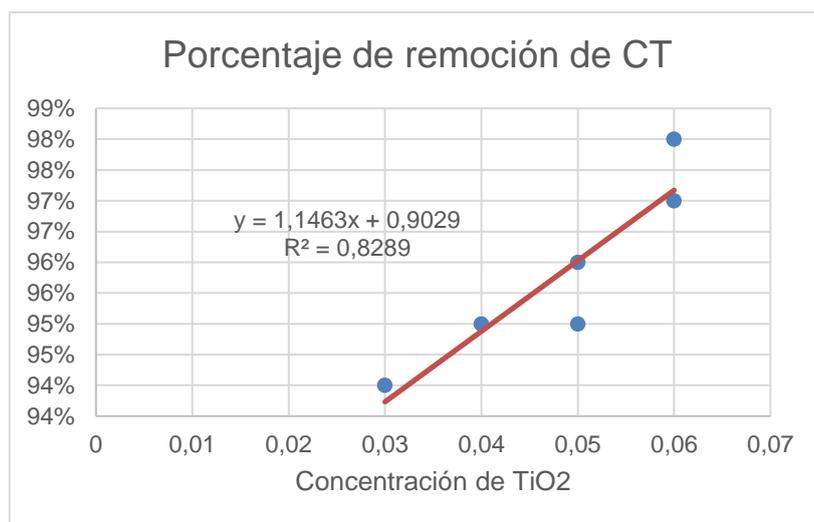


**Gráfico 8.** Representación gráfica del proceso de los valores de pH y el % de remoción de CT en el proceso de fotocátalisis heterogénea.

La recta de regresión de los puntos de esta representación gráfica del porcentaje de remoción de coliformes totales frente a un pH muestra una

correlación inversamente proporcional, ya que la pendiente es negativa, observándose que a medida que disminuye el pH, aumenta el porcentaje de remoción. Es decir, a medida que se hace más ácido, la inactivación de microorganismos tiene un lugar cada vez mayor.

Cuadro 02: Curva de regresión lineal de la concentración de  $\text{TiO}_2$  Vs % de remoción de coliformes



**Gráfico 9.** Representación gráfica del proceso de los valores de pH y el % de remoción de CT en el proceso de fotocatalisis heterogénea

En el caso con concentración de catalizador, muestra una correlación proporcional con pendiente positiva, observándose que cuando se aumenta la concentración del catalizador el porcentaje de remoción se incrementa. Por lo tanto, existe una correlación alta entre las variables.

#### 4.3. Discusión de resultados

A partir de los resultados obtenidos, se puede observar que en todos los casos de las pruebas realizando el proceso de fotocatalisis heterogénea usando el catalizador  $\text{TiO}_2$  existe una remoción de CT superiores al 90%. En cuanto a la concentración óptima para la remoción de CT fue de 0,06 g/L y para el pH fue 6 y 7, logrando reducir hasta un 98% de CT en un periodo de exposición solar de 6 horas. Estos resultados tienen relación con lo que sostiene Jimenez Margarita (18), quien manifiesta que para obtener

una mayor inactivación bacteriana la concentración del catalizador puede ir desde un rango de 0.05 a 0,2 g/L. En su investigación sostiene que la concentración óptima fue de 0,2 g/L de TiO<sub>2</sub> para el tratamiento del agua residual a través de la fotocatalisis usando foto-reactores CPC, con un tiempo de exposición de 4 horas, logrando una inactivación bacteriana de hasta el 100 %; es decir, inactivación completa de las bacterias en el sistema. Este óptimo resultado puede deberse al incremento de concentración de catalizador con lo que se podría deducir que se obtuvo un mejor resultado en menor tiempo de exposición a la radiación solar.

Alegre Zorrilla (15), en su investigación sobre técnicas de fotocatalisis homogénea y heterogénea, llega a la conclusión de que una mayor degradación de materia orgánica con fotocatalisis heterogénea es de 4.85 horas, lo cual se ha podido verificar en nuestra investigación, debido a que al cabo de las 6 horas de exposición de las muestras a la radiación solar se ha logrado obtener porcentajes de remoción de coliformes totales superiores al 90%.

Con respecto al porcentaje de remoción de coliformes totales, la investigación de Guevara Cardoso (11) sobre tratamiento por fotocatalisis de aguas residuales para agricultura, llega a alcanzar un 79% de remoción de carga microbiana, mientras que en esta investigación se ha logrado alcanzar valores superiores al 90%, todo ello debido a la optimización de los valores de pH y concentración de catalizador en el análisis de las muestras.

Al realizar la prueba ANOVA para el análisis de varianza del proceso de fotocatalisis heterogénea se obtuvo un P(valor) inferior al nivel de significancia (0.05), por lo tanto, al aceptar la hipótesis alterna de investigación se demuestra que el proceso de fotocatalisis heterogénea tiene una influencia significativa en la remoción de coliformes totales de las aguas residuales de la PTAR Jauja, entonces al implementar este proceso como una alternativa de solución, en un posible tercer tratamiento se lograría disminuir la concentración de los parámetros bacteriológicos como la *Escherichia Coli* y Coliformes Totales para fines de reúso de estas aguas.

Crispin Quinto R. (39) en su estudio plantea en una de sus conclusiones que la influencia del pH en el proceso de fotocatalisis es insignificante como para ser tomado en cuenta y discrepa con los resultados obtenidos en esta investigación, ya que para nuestros resultados ANOVA muestra que existe influencia del pH en la concentración final de coliformes totales de acuerdo a las concentraciones utilizadas para las pruebas en la investigación.

- Evaluación de la actividad fotocatalítica del  $\text{TiO}_2$

Las investigaciones que anteceden esta tesis han propuesto que el ataque directo a los microorganismos expuestos a un proceso de fotocátalisis se inicia por foto-oxidación de las moléculas absorbidas en la superficie del  $\text{TiO}_2$ , a partir del efecto de la radiación solar, generando radicales  $\bullet\text{OH}$  y también  $\text{O}_2\bullet^-$  que participan en el proceso degenerativo de los microorganismos expuestos.

Los resultados obtenidos señalan la influencia de la fotocátalisis heterogénea sobre la concentración de CT provocando daño celular gracias a la incidencia de la radiación solar UV principalmente cuando se irradia  $\text{TiO}_2$  con una longitud de onda menor a 400 nm, produciendo el daño a nivel génico (ADN) de las bacterias; la generación de radicales hidroxilo en la superficie del catalizador ocasiona la destrucción y daño a los elementos de la pared celular, perturbando sus funciones vitales. Otra forma de ocasionar daño se debe a la entrada de pequeñas partículas de  $\text{TiO}_2$  en la membrana citoplasmática, oxidando otros componentes celulares como enzimas, proteínas intracelulares, etc., causando la lisis celular. (10)

Al comparar los resultados experimentales de remoción de CT, es preciso destacar que la presencia del  $\text{TiO}_2$  como catalizador incrementa la inactivación bacteriana, pero esta eficiencia va a depender de los factores que influyen su desarrollo.

Como se puede ver, el porcentaje de degradación de los CT con  $\text{TiO}_2$  en suspensión fue eficiente, ya que se muestra en la mayoría de casos remoción de CT superiores al 90 %. No obstante, esta absorción va a depender del pH en el medio en el que se encuentre, pues teniendo en cuenta el punto isoeléctrico del  $\text{TiO}_2$  (6.5), se va a afectar la carga de su superficie, está cargada positivamente si los valores de pH se encuentran por debajo de 6.5 y se encuentra cargada negativamente a pH por encima de 6.5. (40)

Esto explica, en parte, el bajo porcentaje de remoción obtenido para las pruebas con pH 8 y 9. Por otro lado, las muestras expuestas a un pH 6 (valor por debajo del punto isoeléctrico del  $\text{TiO}_2$ ) que se encuentra cargado positivamente, resultó en una mayor remoción de CT; por lo tanto, la combinación de  $\text{TiO}_2$  –pH para una mayor degradación de CT en este estudio es 0.06 g/L y un pH 6.

Trabajos desarrollados con procesos similares de fotocátalisis heterogénea aplicados en diferentes tipos de fotocatalizadores con la aplicación de  $\text{TiO}_2$  mostraron inactividad efectiva de *E. coli* en menos de 4 horas, a mayor concentración del catalizador. Esto podría deberse a que al incrementar la concentración del catalizador aumenta el área

superficial, incrementando sitios activos y, por lo tanto, aumenta la tasa de oxidación. Cabe señalar que un incremento excesivo podría provocar turbiedad de la suspensión y reducir la penetración de la luz al foto-reactor, lo que llevaría a una menor remoción de CT, por ello es importante conocer el límite en el que se alcanza la máxima eficiencia y conocer la dosis óptima para la degradación eficaz de las bacterias y /o contaminantes. Ello también va a depender del tipo y concentración del catalizador y de las condiciones de trabajo del foto-reactor.

- El proceso de fotocátalisis como alternativa de solución

La contaminación de las aguas superficiales por descargas de aguas residuales sin tratamiento o con tratamiento deficiente es un grave problema; por otro lado, la utilización de estas aguas recicladas para la agricultura es una práctica que viene en aumento, principalmente en países donde escasea este vital recurso hídrico. La calidad del tratamiento está relacionada con la calidad microbiológica, puesto que aguas con un alto índice de carga microbiana son consideradas de baja calidad.

Los monitoreos para evaluar el grado de contaminación de las aguas superficiales arrojan resultados no muy satisfactorios, los valores de Coliformes Totales y Termotolerantes superan ampliamente en comparación a la normativa. Con ello, observamos la deficiente gestión en el tratamiento de aguas residuales; en ese sentido, la utilización del proceso de fotocátalisis heterogénea lograría disminuir estas concentraciones, con lo cual sería una buena opción si buscamos solucionar el problema de contaminación de aguas y su posible reutilización para la agricultura o el riego de áreas verdes, ya que no representaría un riesgo para la salud, sin exceder los LMP y el ECA de agua, Categoría 3.

## CONCLUSIONES

- Con base a los resultados experimentales y estadísticos obtenidos, se concluye que la aplicación del proceso de fotocátalisis heterogénea influye significativamente en la concentración de los coliformes totales del agua residual de la PTAR de Jauja, pues se ha podido demostrar en las muestras analizadas un efecto en la disminución de la carga bacteriana logrando su inactivación hasta en un 98%. Esta remoción es altamente eficiente en comparación con los métodos convencionales.
- Tras evaluar los parámetros del proceso de fotocátalisis heterogénea, se concluye que el  $\text{TiO}_2$  es la mejor alternativa como catalizador para procesos fotocatalíticos pues su superficie activa permite la realización de diversos procesos foto-oxidativos y sus partículas permiten la degradación de la carga bacteriana. Así mismo, el nivel de pH es un parámetro importante a considerar para procesos fotocatalíticos con  $\text{TiO}_2$ , pues los resultados indican que los valores de pH van a condicionar la superficie activa del catalizador dependiendo de su punto isoeléctrico. Por otro lado, es pertinente señalar que la exposición de las muestras a la radiación solar por un periodo de tiempo de 6 horas ha permitido la eliminación de coliformes totales con resultados superiores al 90%, por lo que podemos afirmar que la exposición a mayor tiempo tiene una influencia positiva en la eliminación de coliformes totales en la PTAR de Jauja.
- En relación a los valores de pH, con los resultados obtenidos se concluye que existe una influencia de los iones de hidrógeno en el proceso de fotocátalisis heterogénea para la remoción de coliformes totales, a pesar de que la diferencia no es muy grande, se ha podido evidenciar que a valores más bajos de pH analizados presentaron una mayor remoción de CT.
- Existe una relación directa entre el proceso de fotocátalisis heterogénea y la concentración del  $\text{TiO}_2$ . Según las pruebas realizadas, existe una influencia significativa, ya que se obtuvo resultados alentadores, logrando inhibir el crecimiento bacteriano en todos los casos para las diferentes concentraciones del catalizador, así pues, se pudo observar que cuando la concentración del catalizador es mayor, existen más reacciones en la superficie del catalizador, por esta razón se deduce que la concentración de 0,06 g/L fue la concentración de mayor eficacia para el tratamiento por fotocátalisis heterogénea. No obstante, como ya se había mencionado, se tiene que considerar el punto máximo para la reacción fotocatalítica con  $\text{TiO}_2$ , para que el proceso no sea

afectado por una suspensión de partículas en el medio que impidan la transmitancia de la luz UV, lo cual afectaría el sistema planteado.

- Finalmente, se puede afirmar que el proceso de fotocátalisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$  es una buena alternativa para el tratamiento complementario de aguas residuales pues su tecnología es eficaz en la inactivación de los coliformes totales, permitiendo obtener un efluente de mejor calidad, de manera que estas aguas puedan ser utilizadas con fines agrícolas.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda en futuras investigaciones realizar pruebas utilizando diferentes intervalos de tiempo, ya que por la premura del tiempo no ha sido posible analizar mayor cantidad de muestras en el laboratorio.
- Para realizar los procesos de fotocátalisis, se tienen dos alternativas: la primera es empleando una fuente de luz ultravioleta artificial y la segunda mediante la exposición a la luz solar. Por temas de ahorro energético, se recomienda realizar el proceso utilizando energía solar.
- En estudios similares, se ha determinado una mayor eficiencia en la remoción de los contaminantes al adicionar a la reacción una concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (peróxido de hidrógeno). La eficiencia remocional puede deberse a una mayor generación de radicales hidroxilo. Se recomienda realizar estudios con el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para poder evaluar el nivel de eficiencia remocional.
- Mejorar la determinación de concentración de Coliformes Totales con otro método analítico, como el uso de un contador de colonias para una mayor precisión a la hora de determinar la concentración de poblaciones microbianas.
- Realizar ensayos complementarios para estudiar la acumulación de TiO<sub>2</sub> en el interior del reactor fotocatalítico y de esta manera establecer qué medidas se deben tomar para poder recuperar el TiO<sub>2</sub> y reutilizarlo en otro proceso.
- Se recomienda realizar estudios para inactivación de bacterias mediante tratamientos fotocatalíticos con TiO<sub>2</sub> inmovilizado para poder hacer una comparación de resultados con esta tesis donde se utilizó el catalizador TiO<sub>2</sub> en suspensión y así poder observar qué procedimiento logra una mayor remoción y en menor tiempo.
- Es importante, para fines prácticos, conocer el límite donde el catalizador TiO<sub>2</sub> logra su máxima eficiencia para la inactivación de la carga bacteriana, aunque esto también va a depender de la geometría y de las condiciones de trabajo del fotoreactor.
- Analizar las variables intrínsecas que afectan la fotocátalisis heterogénea con TiO<sub>2</sub>; por ejemplo, se debe tener en cuenta el tamaño de partícula de catalizador, su estructura cristalina y su área superficial; de la misma forma considerar aquellas variables extrínsecas como la temperatura y la intensidad de la radiación solar incidente.

- Para una posible implementación del proceso fotocatalítico como tratamiento terciario, se recomienda realizar nuevos ensayos a escala piloto y observar cómo influiría en una posible implementación de un proceso fotocatalítico en una PTAR.
- Por último, se recomienda plantear más investigaciones con los Procesos de Oxidación Avanzada, pues se ha demostrado su elevada eficiencia en la degradación de contaminantes de difícil depuración frente a tratamientos convencionales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GABRIEL, E., y GARCIA, A. Análisis de los cambios de uso de tierra y sus dinámicas territoriales la cuenca baja del Rio Chilca, Perú. Lima : ISSN, 2020. Vol. 16.
2. GREEN, FACTS. Green Facts and Health and the environment. [En línea] 18 de Marzo de 2016. <https://www.greenfacts.org/es/gestion-aguas-residuales/index.htm>.
3. YEE-BATISTA, C. Un 70% de las aguas residuales de las aguas residuales de Latinoamérica vuelven a los rios sin ser tratadas. [En línea] Diciembre de 2018. <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminados>.
4. AMARILDO, E. Aguas residuales en el Perú, problemática y uso en la agricultura. repositorio digital de recursos hídricos. [En línea] Noviembre de 2017. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4516>.
5. MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCION Y SANEAMIENTO. Decreto Supremo N° 021 - 2009 - Vivienda (Valores Maximos Admisibles). Lima, Perú [En línea] Noviembre de 2017. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales?sheet=169>
6. AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA (ANA). Ley de Recursos Hídricos: Ley 29338. Ediciones ANA - Publicaciones. [En línea] Mayo de 2018. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/228>.
7. SEVILLA, J. Manual de buenas prácticas para el uso seguro y productivo de las aguas residuales domésticas. Lima : Autoridad Nacional del Agua, 2016. Vol. I.
8. INGARUCA, K. Evaluación del tiempo de contacto y la concentración de nanopartículas de dióxido de titanio en la desinfección de las bacterias E.coli de las aguas residuales municipales tratadas. Huancayo : Universidad Continental, 2021.
9. SILVA, A, MONGE, S y y BENGOA, C. Manual Técnico sobre Procesos de Oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales. s.l. : Ciencia y Tecnología para el desarrollo CYTED, 2019. Vols. I - ISBN: 978-84-09-08637-5.
10. ROJAS, N., y SANCHEZ, A. Evaluación de tres metodos para la inactivación de coliformes y Escherichia coli presentes en agua residual domestica, empleada para riego. Bogotá : Pontificia Universidad Javeriana, 2017. Vols. II - 15-139-149.
11. GUEVARA, A. Tratamiento por fotocatalisis de aguas contaminadas para su uso en la agricultura. Barcelona : Instituto Superior de Tecnologias y Ciencias Aplicadas, 2017.
12. MUÑOZ, Y. y PALOMINO, S. Influencia de la concentración de TiO<sub>2</sub> y tiempo de tratamiento en la reducción de DQO de las aguas residuales del camal por fotocatalisis heterogénea. Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019.
13. HUANCA, Y. Tratamiento de aguas residuales de la Universidad Nacional del Centro del Perú por fotocatalisis heterogénea. Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019.
14. SOTO, L. Eficiencia de la fotocatalisis con Plata (Ag) para la inactivacion de Coliformes Totales

presente en agua de Pozo del AA.HH Marquez-Callao 2018. Lima : Universidad Cesar Vallejo, 2018.

15. ALEGRE, Y y y ROSALES, S. Influencia del tipo de fotocatalisis y tiempo en el tratamiento de aguas residuales textiles. Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2017.
16. JARAMILLO, B., y PINZON, S. Evaluación de la degradación de los residuos de los colorantes obtenidos de la Prácticas de Química II de la Universidad Tecnológica de Pereira, por el método de Fotocatálisis Heterogénea con Dióxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>) en Reactor Heliofotocatalico. Colombia : Universidad Tecnológica de Pereira, 2017.
17. CASIERRA, H. Desinfeccion de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso. Colombia : Tecnologia y Ciencia del Agua, 2016. Vol. 7.
18. JIMENEZ, M. Desarrollo de nuevas estrategias basadas en fotocatalisis solar para la regeneración de aguas de una insdustria agro-alimentaria. Almeria - España : Universidad Almeriensis, 2016.
19. VARGAS, C. Tratamiento de aguas residuales mediante la combinación de técnicas avanzadas de Oxidación y biofiltros. Las Palmas : Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2016.
20. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO. Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú. Lima - Perú : Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2013. Vol. I.
21. MINISTERIO DEL AMBIENTE. Ley General del Ambiente N° 28611. www.minam.gob.pe. [En línea] Normas Legales El Peruano, 15 de Octubre de 2005. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/06/ley-general-del-ambiente.pdf>.
22. MINISTERIO DEL AMBIENTE. Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM límites máximos permisibles. www.minam.gob.pe. [En línea] Sistema Nacional de Información Ambiental, 17 de Marzo de 2010. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/limites-maximos-permisibles-lmp-efluentes-plantas-tratamiento-aguas>.
23. MINISTERIO DEL AMBIENTE. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM Aprueban los estándares de calidad Ambiental Estandares de Calidad Ambiental. www.minam.gob.pe. [En línea] 2017. <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>
24. RAMOS, C. Modelo de tratamiento de aguas residuales lodos activados convencional en el valle del Mantaro. Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2014
25. PANTOJA, J. Eficiencias comparativas de inactivacion de bacterias coliformes en efluentes municipales por fotolisis UV y por fotocatalisis TiO<sub>2</sub> caso depuradoras aguas de Salamanca. Salamanca - España : Revista Mexicana de Ingenieria Química, 2015. Vols. 14- I.
26. BRIONES, L. Eficiencia de la Planta de Tratamiento de aguas residuales en la remoción de Coliformes Totales, Fecales y Escherichia coli en Celendin - Cajamarca. s.l. : Universidad Nacional de Cajamarca, 2019.
27. ARCE, L. Urbanizaciones Sostenibles: Descentralizacion del Tratamiento de Aguas Residuales

Domésticas. Lima : Pontificia Universidad Católica del Perú, 2016.

28. VALERO, M. Desarrollo de nuevos fotocatalizadores de dióxido de titanio para la fotodegradación de contaminantes en aguas utilizadas para el tratamiento postcosecha de frutas. Valencia - España : Universidad de Valencia, 2017.
29. BERMEJO, M. y MONTEVERDE, P. Fotocatálisis y su capacidad descontaminante. Aplicación en Gran Vía. Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2018.
30. GARCES, L. Fotocatálisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Antioquia - Colombia : Corporacion Universitaria Lasallista, 2015. ISSN- 1794-4449.
31. GUARIN, C., y MERA A. Fotocatálisis Heterogénea con  $TiO_2$  para el Tratamiento de desechos líquidos con presencia del indicador verde de Bromocresol. Medellín - Colombia : Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 2016. Vols. 10-19. ISSN 1692-3324.
32. HINCAPIE, G., OCAMPO, D., y RESTREPO, G. Fotocatálisis Heterogénea y Foto-Fenton aplicadas al Tratamiento de Aguas de lavado de la Producción de Biodiesel. Medellín - Colombia : Grupo Procesos Físicoquímicos, Universidad de Antioquía, 2015. Vol. 22. 2: ISSN 0718-0764.
33. CABAÑAS D., MOTA, V., y RUIZ, J. Luz solar y  $TiO_2$  para eliminar patógenos contenidos en agua de pozo: comportamiento de la fotocatálisis. Yucatán - México : Ingeniería Revista Académica de la Universidad Autónoma de Yucatán, 2019. Vols. 23-1.
34. CAMACHO, A., y ARIOS, L. Diccionario de términos ambientales. La Habana : Centro Félix Valera, 2012. ISBN 978-959-7071-16-7.
35. VILLANUEVA, C. Fotocatálisis con  $TiO_2$  /Ultravioleta y  $TiO_2$   $CuSO_4$ / visible como sistemas de desinfección para inactivar E.coli proveniente de agua residual doméstica. Bogotá - Colombia : Pontificia Universidad Javeriana, 2011.
36. ÑAUPAS, H, MEJÍA, E y NOVOA, E. Metodología de la Investigación. Bogotá - Colombia : Ediciones de la U, 2014. ISBN 978-958-762-188-4.
37. HERNANDEZ SAMPIERI R., Metodología de la Investigación. México D.F : McGraw - Hill / INTERAMERICANA EDITORES S.A, 2014. ISBN: 978-4562-2396-0.
38. BELTRAN - BELTRAN, et al. Influencia de Microorganismos eficaces sobre la calidad de agua y lodo residual, Planta de Tratamiento de Jauja. Huancayo : Universidad Nacional del Centro de Perú, 2017.
39. CRISPIN, R., INGA, J. Estudio de la influencia de la temperatura, ph y tiempo de permanencia en el tratamiento de aguas residuales municipales del barrio de San Antonio mediante un reactor fotocatalítico a nivel laboratorio. Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2015. Vol.
40. HURTADO, R. Evaluación del nivel de envenenamiento del  $TiO_2$  por compuestos intermedios formados durante la degradación fotocatalítica. Michoacán - México : Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, 2012.

## ANEXOS

### Anexo 1. Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variable o Indicadores	Metodología
<p><b>Problema General</b></p> <p>¿Cómo influye el proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales del agua residual de la planta de tratamiento de Jauja?</p>	<p><b>Objetivo General:</b></p> <p>Determinar la influencia del proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales de las aguas residuales de la planta de tratamiento de Jauja.</p>	<p><b>Hipótesis General:</b></p> <p>El proceso de fotocátalisis heterogénea influye significativamente en la concentración de coliformes totales del agua residual de la planta de tratamiento de Jauja.</p>	<p><b>Variable Independiente</b></p> <p>Fotocátalisis Heterogénea</p> <p><b>Dimensiones:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentración del catalizador</li> <li>• Tiempo de exposición a la radiación Ultravioleta.</li> <li>• pH</li> </ul>	<p><b>Método de Investigación:</b></p> <p>Método Cuantitativo</p> <p><b>Nivel de Investigación:</b></p> <p>Correlacional - Explicativo</p> <p><b>Tipo de Investigación:</b></p> <p>Investigación Aplicada</p> <p><b>Diseño de Investigación:</b></p> <p>Diseño experimental</p>
<p><b>Problemas Específicos</b></p> <p>¿Cómo los parámetros del proceso de fotocátalisis heterogénea condicionan a concentración de coliformes totales?</p>	<p><b>Objetivos Específicos:</b></p> <p>Determinar los parámetros del proceso de fotocátalisis heterogénea que condicionan la concentración de coliformes totales.</p>	<p><b>Hipótesis Especificas</b></p> <p>Los parámetros del proceso de fotocátalisis heterogénea influyen en la concentración de coliformes totales.</p>	<p><b>Variable Dependiente</b></p> <p>Concentración de Coliformes Totales</p> <p><b>Dimensiones:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coliformes totales</li> </ul>	<p><b>Población y Muestra:</b></p> <p>Población: Aguas residuales la planta de tratamiento de Jauja.</p> <p>Muestra: 1 muestra de 20 litros de agua residual tomadas del colector del efluente de la PTAR Jauja.</p>
<p>¿De qué manera el pH influye en la concentración de coliformes totales del agua</p>	<p>Determinar de qué manera el pH influirá en la concentración de coliformes</p>	<p>El pH influye significativamente en el proceso de fotocátalisis</p>		

residual de la planta de tratamiento de Jauja?	totales del agua residual de la planta de tratamiento de Jauja.	heterogénea en la concentración de coliformes totales del agua residual de la planta de tratamiento de Jauja.	<b>Técnicas de Recolección de datos:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Instrumentos de Medición</li> <li>• Guías y registros de Campo</li> </ul>
¿Cómo la concentración de catalizador TiO <sub>2</sub> influye en la concentración de coliformes totales del agua residual de la planta de tratamiento de Jauja?	Determinar cómo la concentración del catalizador TiO <sub>2</sub> influye en la concentración de coliformes totales del agua residual de la planta de tratamiento de Jauja?	La concentración del catalizador TiO <sub>2</sub> influye en el proceso de fotocátalisis heterogénea en la concentración de coliformes totales del agua residual de la planta de tratamiento de Jauja.	

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2.

## OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

### “Análisis de la influencia de la Fotocatálisis Heterogénea en la Concentración de Coliformes Totales de las Aguas Residuales de la Planta de Tratamiento de Jauja”

➤ Variable independiente

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	OPERACION ALIZACIÓN	CATEGORIZACIÓN O DIMENSIONES	DEFINICIÓN	INDICADOR	NIVEL DE MEDICIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	ÍNDICE	VALOR
FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA	Independiente	Esta variable mide de forma cuantitativa la oxidación química a través de un catalizador para la remoción de contaminantes en el agua residual.	Concentración de catalizador	Cantidad del catalizador introducida para la prueba para favorecer o acelerar su proceso de remoción. (4)	Cantidad en gramos del Catalizador (TiO <sub>2</sub> ) por litro de agua residual de la PTAR Jauja	Intervalo	g/L	Índice de concentración de contaminantes	Porcentaje de remoción de contaminantes
			Tiempo de exposición a la radiación ultravioleta	Representa el tiempo en horas de la muestra expuesta a la intensidad de la radiación solar sobre la superficie de la prueba en el que incide. (14)	Escala de Índice UV		Tiempo (h) Longitud de onda en nanómetros		< 41% 41-60% 61-80%
			pH	El pH representa el grado de acides o alcalinidad de la muestra (15)	Ph: intervalo de 1-14		unidad		81-100%

➤ Variable dependiente

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	OPERACIONALIZACIÓN	CATEGORIZACIÓN O DIMENSIONES	DEFINICIÓN	INDICADOR	NIVEL DE MEDICIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	ÍNDICE	VALOR
<b>CONCENTRACIÓN DE COLIFORMES TOTALES</b>	Dependiente	Esta variable mide de forma cuantitativa la cantidad de coliformes totales presentes en el agua residual.	Concentración de coliformes	Cantidad bacterias facultativas que se desarrollan en las aguas residuales proveniente de las heces de los seres vivos.	Período de cultivo 24 a 48 horas	Intervalo	UFC/100 mL ó NMP/100 mL	Índice de disminución de contaminantes	Porcentaje de remoción de contaminantes.  < 41% 41-60% 61-80% 81-100%

**Anexo 2.** Panel fotográfico - Visita a la PTAR Jauja.



Fotografía 1. Puerta de ingreso a la PTAR Jauja



a)



b)

Fotografía 2. a) Ingreso del agua residual y medición del caudal b) Laguna de oxidación secundaria.



Fotografía 3. Tratamiento biológico en las lagunas de oxidación



Fotografía 4. Efluente final del agua residual tratada de la PTAR Jauja

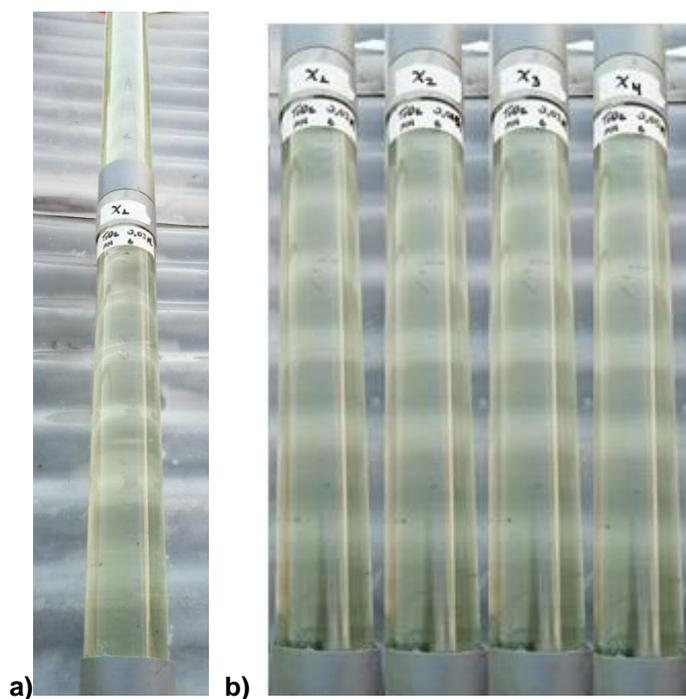


Fotografía 5. Toma de muestra del efluente del PTAR Jauja.

### Anexo 3. Proceso de fotocálisis heterogénea

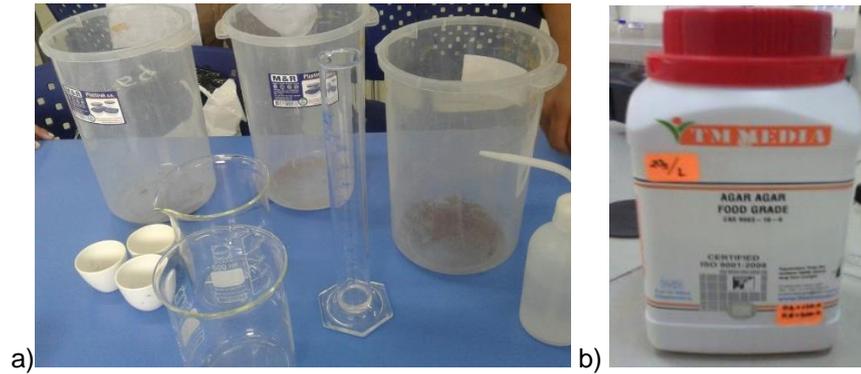


Fotografía 6. a) Pesaje del catalizador  $\text{TiO}_2$ . b) Medición del pH



Fotografía 7. a) Montaje de los tubos de vidrio contenidos del agua residual del efluente de la PTAR Jauja, con nivel de pH regulado más el catalizador añadido. b) Muestras expuestas a la radiación solar, para iniciar el proceso de fotocátalisis heterogénea.

**Anexo 4. Panel fotográfico – Análisis en laboratorio**



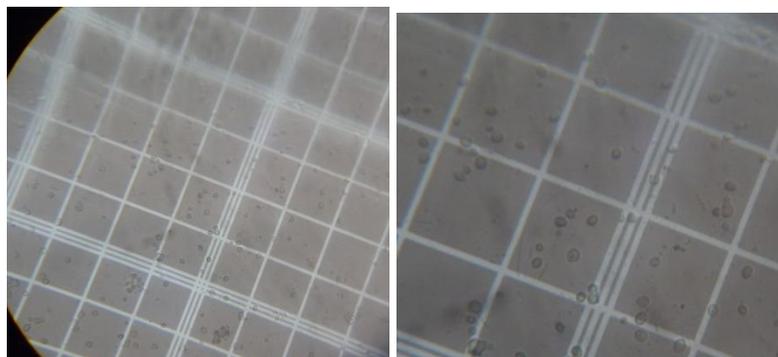
Fotografía 8. a) Materiales de laboratorio, b) Agar nutritivo



Fotografía 9. Siembra de cultivo bacteriano, *E. coli*



Fotografía 8. Colonias formadas en el medio de cultivo



Fotografía 9. Recuento de colonias por el método de placas