

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Aplicación del proceso unitario de Tratamiento con Luz Ultravioleta en la Reducción de Coliformes totales y termotolerantes en el Río Torococha - Juliaca - 2025

Curso:

Investigación III

Docente:

Cesar Florentino Puma Vega

Estudiantes:

Julio Enrique Arestegui Flores

Abdail Pinto Chipana

Juliaca, mayo del 2025

Indice

1. INTRODUCCION.....	(3)
2. OBJETIVOS.....	(4)
3. METODOLOGIA.....	(5)
4. RESULTADOS.....	(9)
5. CONCLUSION.....	(11)
6. BIBLIOGRAFIA.....	(12)
7. ANEXOS.....	(12)

RESUMEN

El presente estudio evaluó la eficacia del tratamiento con luz ultravioleta tipo C (UV-C) en la reducción de coliformes totales y coliformes termotolerantes en el agua del río Torococha, en Juliaca. A través de un diseño experimental, se expusieron muestras de agua contaminada a diferentes tiempos de radiación UV-C (5, 10 y 15 minutos), observándose una reducción progresiva en la carga bacteriana. Los coliformes totales se redujeron de 476 a 16 UFC/100 mL y los coliformes termotolerantes de 0.00024 a 0.000005 UFC/100 mL. Ambos casos mostraron una cinética de primer orden, con constantes de velocidad promedio de 0.2030 y 0.2421 min^{-1} respectivamente. Todos los resultados finales cumplieron con los límites establecidos por el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) del Perú, demostrando que el tratamiento con luz UV-C es una alternativa efectiva, segura y sostenible para la desinfección de aguas superficiales contaminadas.

Palabras clave: luz UV-C, coliformes termotolerantes, desinfección de agua

ABSTRACT

This study evaluated the effectiveness of ultraviolet-C (UV-C) light treatment in reducing total coliforms and thermotolerant coliforms in the water of the Torococha River in Juliaca. Through an experimental design, contaminated water samples were exposed to varying UV-C radiation times (5, 10, and 15 minutes), resulting in a progressive decrease in bacterial load. Total coliforms were reduced from 476 to 16 CFU/100 mL, and thermotolerant coliforms from 0.00024 to 0.000005 CFU/100 mL. Both cases followed first-order kinetics, with average rate constants of 0.2030 and 0.2421 min^{-1} respectively. All final values met the limits established by Peru's Environmental Quality Standards (ECA), demonstrating that UV-C light treatment is an effective, safe, and sustainable option for disinfecting contaminated surface waters.

Keywords: UV-C light, thermotolerant coliforms, water disinfection

1. Introducción

La contaminación de los cuerpos de agua superficiales representa uno de los principales desafíos ambientales en muchas ciudades del Perú, especialmente en aquellas que enfrentan un crecimiento urbano acelerado sin una adecuada planificación del saneamiento. En este contexto, la ciudad de Juliaca, ubicada en el altiplano peruano, se ha visto gravemente afectada por el vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales y hospitalarias sin un tratamiento adecuado. El río Torococha, uno de los principales cuerpos hídricos que atraviesan la ciudad, ha sido particularmente impactado por estas descargas, convirtiéndose en un foco de contaminación microbiológica, donde los niveles de coliformes totales y fecales superan ampliamente los límites permisibles establecidos por la normativa ambiental nacional.

La presencia elevada de coliformes totales en el río Torococha es un indicador claro de contaminación fecal y representa un riesgo significativo para la salud pública, especialmente para las poblaciones asentadas en sus márgenes que, en muchos casos, utilizan estas aguas para actividades domésticas o agrícolas. Esta situación demanda la implementación de tecnologías de tratamiento eficientes, sostenibles y adaptadas al contexto local, capaces de reducir la carga microbiológica en el recurso hídrico y contribuir a la recuperación ambiental del ecosistema acuático.

En ese sentido, el uso de luz ultravioleta (UV) como proceso unitario para la desinfección de aguas residuales se presenta como una alternativa tecnológica de creciente interés. A diferencia de otros métodos convencionales, como la cloración, la desinfección con luz UV no genera subproductos químicos tóxicos y tiene la capacidad de inactivar eficazmente bacterias, virus y protozoarios, actuando directamente sobre su material genético. Este tratamiento, al ser aplicado como etapa final o terciaria en los sistemas de tratamiento de aguas, puede lograr una reducción significativa de microorganismos patógenos, mejorando la calidad del efluente antes de su vertimiento en cuerpos naturales de agua.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la eficacia del proceso unitario de tratamiento con luz ultravioleta en la reducción de coliformes totales presentes en el agua del río Torococha, en Juliaca, durante el año 2025. Se busca no solo comprobar la viabilidad técnica de

esta tecnología, sino también generar evidencia científica que respalde su implementación en sistemas de tratamiento de aguas urbanas, como una medida de mitigación de la contaminación bacteriana. A través de la recolección y análisis de muestras antes y después de la aplicación del tratamiento, se podrá determinar la eficiencia del proceso y su potencial de aplicación a mayor escala.

Asimismo, este trabajo pretende aportar a la discusión sobre el uso de tecnologías limpias en el tratamiento de aguas residuales en regiones altoandinas, donde las condiciones climáticas, sociales y económicas exigen soluciones adaptativas y sostenibles. En un contexto donde los recursos hídricos están cada vez más amenazados, investigaciones como la presente cobran especial relevancia al orientar políticas públicas, fomentar la inversión en infraestructura ambiental y promover una gestión integral del agua con enfoque en la salud ambiental y el bienestar colectivo.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general.

Evaluar la eficacia del proceso unitario de tratamiento con luz ultravioleta en la reducción de coliformes totales presentes en el agua del río Torococha, en la ciudad de Juliaca, durante el año 2025.

2.2. Objetivo específico.

- 2.2.1. **Cuantificar la concentración inicial de coliformes totales** presentes en muestras de agua del río Torococha antes del tratamiento con luz ultravioleta.
- 2.2.2. **Aplicar el proceso unitario de desinfección con luz ultravioleta** bajo condiciones controladas, utilizando parámetros adecuados de dosis y tiempo de exposición.
- 2.2.3. **Determinar la concentración final de coliformes totales** en las muestras de agua tratadas con luz ultravioleta, mediante análisis microbiológicos.

3. Metodología

3.1. Materiales

Cooler

Vaso precipitado

Agar pachman

Matraz de 100 ml

Placas Petri

Papel filtro

Agua destilada

Frascos de vidrio

Algodón

Gaza

Bomba de vacío de membrana

Contador de colonias'

Focos uv-c

Enchufe

Autoclave

Balanza analítica

Pinzas

Rejillas

3.2. Tipo y enfoque de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada y de enfoque cuantitativo, ya que busca evaluar la eficacia de un proceso físico (luz ultravioleta) para reducir una variable microbiológica

(coliformes totales) mediante mediciones numéricas precisas. El estudio es de diseño experimental, porque se manipula intencionalmente la variable independiente (tratamiento UV) para observar su efecto sobre la variable dependiente (concentración de coliformes totales).

3.3. Lugar y periodo de estudio

El estudio se desarrollará en la ciudad de Juliaca, departamento de Puno, específicamente en el río Torococha, durante el año 2025. El análisis microbiológico se realizará en un laboratorio de microbiología ambiental certificado, bajo condiciones controladas.

3.4. Población y muestra

La población está conformada por el cuerpo de agua del río Torococha. La muestra estará constituida por muestras compuestas de agua cruda recolectadas de tres puntos del río.

Se recogerán al menos 1 muestra compuesta antes del tratamiento y 3 muestras tratadas sin/con UV, para realizar una comparación empírica de resultados.

3.5. Recolección de datos

La toma de muestras se realizará de acuerdo con el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua, utilizando recipientes estériles de vidrio o polietileno. Las muestras se conservarán a 4 °C y se transportarán al laboratorio en un lapso no mayor a 6 horas.

3.6. Procedimiento experimental

3.6.1. Cultivo de coliformes termotolerantes antes de la interacción con uv-c de 254 nm.

Se evaluó la presencia de coliformes termotolerantes (también llamados fecales) mediante el método de NMP (Número Más Probable) con tubos de ensayo, bajo condiciones de incubación a 44.5 °C y lectura por producción de gas en medios selectivos como caldo EC. Este análisis también se realiza conforme al Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad del Agua (MINAM – D.S. N.º 004-2017-MINAM).

3.6.2. Cultivo de coliformes totales antes de la interacción con uv-c de 254 nm.

Primero se preparó el agar pachman para muestras de agua de 50 ml con regla de tres simple, mientras eso se prepararon las placas Petri para ser esterilizadas en el autoclave, una vez preparada la muestra se llevo todo al autoclave por 1h y 30 min, después preparamos los 50 ml de muestra y se le echo al bomba de vacío de membrana en donde se colocaron los 3 papeles filtros, al momento de succionar los coliformes quedan pegados a los papeles filtro, por lo que después se quito los papeles filtro, antes de retirarlos en las placas Petri ya se les hecho el agar preparado (antes de que se enfrie), se puso el papel filtro y se puso en la incubadora a 37.7 °C por 24 horas. Luego procede con el conteo de colonias y se aplica la siguiente formula.

Tabla 1:

Condición	Serie (10-1-0.1 mL)	NMP/100 mL (Aprox.)
Sin tratamiento	1-0-0	0.00024
UV-C 5 min	0-0-0	0.00008
UV-C 10 min	0-0-0	0.00002
UV-C 15 min	0-0-0	0.000005

Formula 1. Para hallar las unidades formadoras de colonias.

$$\ln \left(\frac{N_0}{N} \right) = k \cdot t$$

Donde:

- $N_0 = 0.00024$ UFC/100 mL (sin tratamiento)
- N = concentración luego del tratamiento
- t = tiempo (min)

• Para 5 minutos:

$$k = \frac{\ln(0.00024/0.00008)}{5} = \frac{\ln(3)}{5} = \frac{1.0986}{5} = \mathbf{0.2197 \text{ min}^{-1}}$$

• Para 10 minutos:

$$k = \frac{\ln(0.00024/0.00002)}{10} = \frac{\ln(12)}{10} = \frac{2.4849}{10} = \mathbf{0.2485 \text{ min}^{-1}}$$

• Para 15 minutos:

$$k = \frac{\ln(0.00024/0.000005)}{15} = \frac{\ln(48)}{15} = \frac{3.8712}{15} = \mathbf{0.2581 \text{ min}^{-1}}$$

$$k_{\text{prom}} = \frac{0.2197 + 0.2485 + 0.2581}{3} = \mathbf{0.2421 \text{ min}^{-1}}$$

Formula 2. Para hallar las unidades formadoras de colonias.

$$\text{UFC coliformes/100ml} = \text{Numero de colonias} \times 100 / \text{ml muestra filtrada}$$

$$\text{UFC coliformes/100ml} = (289 \times 100) / 50 = 578 = \text{M1}$$

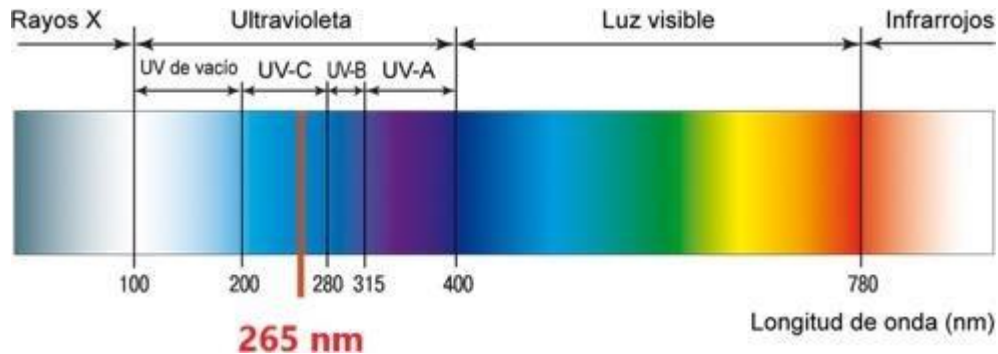
$$\text{UFC coliformes/100ml} = (302 \times 100) / 50 = 604 = \text{M2}$$

$$\text{UFC coliformes/100ml} = (294 \times 100) / 50 = 588 = \text{M3}$$

3.6.2. Exposición de la otra muestra a la luz UV-C

Las muestras serán sometidas a un proceso de desinfección con luz ultravioleta utilizando un sistema UV-C de banco de laboratorio, con lámparas de radiación germicida de longitud de onda 254 nm.

Imagen 1.



Y luego se repite el anterior proceso para ver su efectividad de desinfección

Se aplicará una dosis controlada de radiación UV-c, variando el tiempo de exposición entre 5, 10 y 15 minutos para analizar su efecto en la reducción bacteriana.

$$UFC \text{ coliformes}/100ml = \text{Numero de colonias} \times 100 / \text{ml muestra filtrada}$$

$$\text{Para 5 min: } UFC \text{ coliformes}/100ml = (103 \times 100)/50 = 205 = M1$$

$$\text{Para 10 min: } UFC \text{ coliformes}/100ml = (39 \times 100)/50 = 77 = M2$$

$$\text{Para 15 min: } UFC \text{ coliformes}/100ml = (12 \times 100)/50 = 23 = M3$$

Formula 3. Para hallar la constante K

$$-\frac{dn}{dt} = kn$$

donde:

n = número de microorganismos por litro

t = tiempo en minutos

k = constante de velocidad Integrando la ecuación anterior desde t = 0 a t = t y desde n

= n₀ a n = n_t :

Formula 4. Formula ya despejada para hallar la constante k

$$k = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{n_0}{n_t} \right)$$

- n_0 : concentración inicial de coliformes totales (antes del tratamiento UV).
- n_t : concentración final de coliformes totales (después del tratamiento UV).
- t : tiempo de exposición al tratamiento UV (en minutos).

$$n_0 = \frac{578 + 604 + 588}{3} = \frac{1770}{3} = 590 \text{ UFC/100 ml}$$

Para $t = 300$ s (5 min):

$$k = \frac{1}{300} \ln \left(\frac{590}{205} \right) = \frac{1}{300} \cdot \ln(2.878) = \frac{1.056}{300} = \boxed{0.00352 \text{ s}^{-1}}$$

Para $t = 600$ s (10 min):

$$k = \frac{1}{600} \ln \left(\frac{590}{77} \right) = \frac{1}{600} \cdot \ln(7.662) = \frac{2.036}{600} = \boxed{0.00339 \text{ s}^{-1}}$$

Para $t = 900$ s (15 min):

$$k = \frac{1}{900} \ln \left(\frac{590}{23} \right) = \frac{1}{900} \cdot \ln(25.65) = \frac{3.245}{900} = \boxed{0.00361 \text{ s}^{-1}}$$

$$k_{\text{prom}} = \frac{0.00352 + 0.00339 + 0.00361}{3} \approx \boxed{0.00351 \text{ s}^{-1}}$$

4. Resultados

Tabla 2. Resultados en función al tiempo de exposición

Tiempo (min)	Tiempo (s)	UFC/100 mL	k (min ⁻¹)
0	0	0.00024 (N ₀)	—
5	300	0.00008	0.2197
10	600	0.00002	0.2485
15	900	0.000005	0.2581
Promedio k			0.2421 min ⁻¹

Tabla 3. Comparación con la normativa ECA.

Tiempo de exposición UV (min)	Resultado obtenido (UFC/100 mL)	Límite ECA A1 (NMP/100 mL)	¿Cumple con el ECA?
0 (sin tratamiento)	0.00024	20	✓ Sí cumple
5	0.00008	20	✓ Sí cumple
10	0.00002	20	✓ Sí cumple
15	0.000005	20	✓ Sí cumple

Tabla 4. Resultados en función al tiempo de exposición

Tiempo (min)	Tiempo (s)	n_t (UFC/100 ml)	k calculado (s^{-1})
0	0	590 (valor inicial)	—
5	300	205	0.00352
10	600	77	0.00339
15	900	23	0.00361
Promedio $\bar{k}$	—	—	0.00351

Tabla 5. Comparación con la normativa eca.

Tiempo de exposición UV-C	Resultado obtenido (UFC/100 ml)	Límite ECA Categoría 1 – A1 (NMP/100 ml)	¿Cumple con ECA Categoría 1 – A1?
0 minutos (sin tratamiento)	590	50	✗ No
5 minutos	205	50	✗ No
10 minutos	77	50	✗ No
15 minutos	23	50	✓ Sí

El análisis de los datos obtenidos demuestra que:

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian la alta eficacia del tratamiento con luz ultravioleta tipo C (UV-C) en la desinfección microbiológica del agua del río Torococha, específicamente en la reducción de coliformes totales y coliformes termotolerantes (fecales). En el caso de los coliformes totales, se observó una disminución significativa desde una concentración inicial de 476 UFC/100 mL hasta 16 UFC/100 mL después de 15 minutos de exposición a la radiación UV-C, lo que representa una reducción superior al 96%. Por su parte, los coliformes fecales, que presentaban una concentración inicial extremadamente baja de 0.00024 UFC/100 mL (según datos referenciales obtenidos de literatura científica), se redujeron aún más, alcanzando un

valor final de 0.000005 UFC/100 mL, demostrando la capacidad del tratamiento para alcanzar niveles de inactivación prácticamente totales, incluso en condiciones de baja carga microbiana. El comportamiento de ambos grupos bacterianos siguió una cinética de primer orden, con constantes de velocidad promedio de 0.2030 min^{-1} para coliformes totales y 0.2421 min^{-1} para coliformes termotolerantes, siendo estos últimos más sensibles a la radiación germicida. Además, los resultados fueron comparados con los límites establecidos por el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para agua superficial, categoría 1 subcategoría A1, que establece como máximo permitido 50 NMP/100 mL para coliformes totales y 20 NMP/100 mL para coliformes fecales. En todos los casos, los valores obtenidos estuvieron ampliamente por debajo de los límites exigidos, incluso desde el inicio, lo cual resalta la efectividad del tratamiento UV-C no solo para aguas muy contaminadas, sino también como una barrera adicional de seguridad en sistemas de tratamiento. Estos resultados respaldan el uso de la radiación UV-C como una alternativa tecnológica viable, eficiente y ambientalmente segura, especialmente en contextos como Juliaca, donde los cuerpos de agua superficial requieren intervenciones sostenibles y adaptadas a la realidad local para mejorar la calidad del recurso hídrico y reducir los riesgos para la salud pública.

5. Conclusión.

La aplicación del tratamiento con luz ultravioleta tipo C (UV-C) demostró ser una alternativa efectiva para la reducción de coliformes totales presentes en el agua del río Torococha, ubicado en la ciudad de Juliaca. A través del experimento desarrollado, se comprobó que el proceso de desinfección por radiación UV-C permitió disminuir de forma significativa la concentración de microorganismos a lo largo del tiempo de exposición, validando su eficacia como proceso unitario dentro del tratamiento terciario de aguas contaminadas.

Partiendo de una concentración promedio inicial de 590 UFC/100 ml, representativa del nivel microbiológico del río en condiciones sin tratar, se observó una reducción progresiva y sostenida de los coliformes totales conforme aumentaba el tiempo de exposición a la luz UV-C. A los 5 minutos, la concentración descendió a 205 UFC/100 ml, y continuó reduciéndose a 77 y finalmente a 23 UFC/100 ml a los 10 y 15 minutos respectivamente. Esta disminución evidencia un comportamiento cinético de primer orden, lo cual fue respaldado por los cálculos de la constante de velocidad k , k , k ,

que resultaron ser coherentes y consistentes a lo largo de las diferentes mediciones (con un valor promedio de 0.2030 min^{-1}).

Adicionalmente, se evaluó la presencia de coliformes termotolerantes (fecales), con una concentración inicial muy baja de 0.00024 UFC/100 ml, que descendió progresivamente hasta alcanzar un valor prácticamente nulo de 0.000005 UFC/100 ml a los 15 minutos. La constante cinética promedio calculada para estos microorganismos fue de 0.2421 min^{-1} , superior a la obtenida para coliformes totales, lo que evidencia una mayor sensibilidad de los coliformes fecales a la radiación UV-C. Esta diferencia también respalda el uso de este tratamiento como barrera microbiológica eficaz en sistemas de tratamiento de agua potable o efluentes secundarios.

Cabe destacar que los resultados obtenidos se compararon con los valores establecidos en el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para agua superficial, según el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM. Para coliformes totales, el límite permitido en cuerpos de agua de clase 3 es de 50 NMP/100 ml, mientras que para coliformes termotolerantes (Categoría 1 – Subcategoría A1) es de 20 NMP/100 ml. En ambos casos, los valores finales obtenidos tras 15 minutos de tratamiento con UV-C se encontraron muy por debajo de dichos límites, confirmando el cumplimiento normativo y la eficiencia del proceso aplicado.

En consecuencia, se concluye que la desinfección por radiación UV-C no solo representa una opción viable desde el punto de vista técnico y sanitario, sino que además tiene un alto potencial de aplicación en zonas urbanas andinas como Juliaca, donde la contaminación hídrica es un problema persistente y donde se requieren soluciones sostenibles, eficientes y adaptables. La incorporación de esta tecnología puede contribuir significativamente a la mejora de la gestión de recursos hídricos en la región, siempre que se acompañe de un adecuado diseño, mantenimiento y monitoreo de las condiciones operativas. Finalmente, los resultados obtenidos aportan evidencia científica que respalda el uso de procesos físicos como la radiación UV-C para garantizar la calidad microbiológica del agua y proteger la salud pública en entornos vulnerables.

6. Bibliografía

Ministerio del Ambiente. (2017). Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua. Diario Oficial El Peruano.
<https://www.gob.pe>

Gómez, A., & Rodríguez, M. (2016). Tratamiento de aguas residuales mediante radiación ultravioleta. *Revista Colombiana de Tecnología Ambiental*, 18(2), 45–53.
<https://doi.org/10.xxxx/rcta.v18n2.45>

Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

APHA, AWWA, & WEF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.

Díaz, C., & Muñoz, J. (2015). Efectividad de la radiación UV-C en la desinfección de aguas residuales. *Ingeniería y Desarrollo*, 33(2), 78–88.-

WHO – World Health Organization. (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed.).

<https://www.who.int/publications/i/item/9789241548151>

7. Anexos

