

Diseño de un equipo de desinfección por luz ultravioleta para el tratamiento de aguas residuales con fines de reutilización

Mayra Sánchez ^{1*}, Nellimar Villalobos ¹, Edixon Gutiérrez ^{1,2} y Yaxcelys Caldera ³

¹Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo, estado Zulia, Venezuela. *mayrasanz23@hotmail.com

²Centro de Investigación del Agua. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, estado Zulia, Venezuela. *egutierr12@gmail.com

³Laboratorio de Investigaciones Ambientales. Núcleo Costa Oriental del Lago. Universidad del Zulia. Cabimas, estado Zulia, Venezuela.

Recibido: 25-02-11 Aceptado: 15-04-11

Resumen

Los sistemas de desinfección por luz ultravioleta (UV) representan un método efectivo para eliminar microorganismos patógenos del agua sin dejar residuos tóxicos. En esta investigación se diseñó un equipo para la desinfección con luz UV para ser desarrollado con materiales de la región, para aguas residuales tratadas con la finalidad de ser reutilizadas en actividades de riego. Se caracterizó el agua residual proveniente del sistema de lagunas de oxidación del Centro de Investigación del Agua. Se determinó la dosis óptima de radiación UV, necesaria para reducir la carga microbiana hasta alcanzar los valores de las normas venezolanas para el riego de hortalizas de consumo humano. Se dimensionó el equipo de desinfección con radiación UV. Para el diseño de la cámara de desinfección con luz UV, se consideraron diferentes áreas de exposición, tiempos de residencia y la cantidad de coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF) iniciales y sobrevivientes al tratamiento, a fin de obtener la ecuación para la desinfección. Debido a las características de las aguas, el mejor tiempo de residencia fue de 90 segundos con una potencia de salida de lámpara UV 90 W. Las medidas del equipo para que ocurra la desinfección con remoción del 99,92% de CF son: 300 cm de longitud, 2,5 cm de ancho y 2 cm de profundidad; ya que presentó la mejor relación, tiempo de residencia, costo de operación, mantenimiento y dimensiones.

Palabras clave: Desinfección, coliformes totales, coliformes fecales, aguas residuales, luz ultravioleta (UV).

Design of disinfection equipment for ultraviolet light to wastewater treatment with goals of reutilization

Abstract

Disinfection systems not only reduce the environmental impact of discarded water, are also a viable solution to the shortage of water in the world, just as they represent an effective method to eliminate pathogens in water without leaving toxic residues. The main purpose of this research was to design equipment for UV using local materials, for disinfection of treated wastewater in order to be used for irrigation of hydroponics. Wastewater was characterized from the oxidation pond of Centro de Investigacion del Agua. The optimal dose of UV radiation was determined to reduce the microbial load to values of venezuelan standard for the irrigation of vegetables for human

consumption. The UV disinfection was sized. An UV chamber was built, which considered different exhibition areas, residence times and initial and treatment surviving of total coliform (TC) and fecal coliforms (FC). The disinfection equations were obtained. Due to the physicochemical characteristics of the waters, the best residence time was 90 seconds with a UV lamp power output of 90 W. The equipment size for disinfection has the following measures: 300 cm long, 2.5 cm wide and 2 cm deep, because it presented the best value of residence time, cost of operation, maintenance and dimensions.

Key words: Disinfection, total and fecal coliforms, UV light.

Introducción

La desinfección del agua se refiere a la destrucción de organismos causantes de enfermedades o patógenos presentes en la misma. Un sistema de desinfección ideal debería garantizar la máxima eficiencia de remoción de microorganismos patógenos sin generar subproductos tóxicos e indeseables [1]. La desinfección con radiación ultravioleta (UV) representa un tipo de desinfectante físico que no deja efecto residual [2], se ha demostrado su eficiencia en la remoción de microorganismos desde aguas residuales domésticas e industriales con la finalidad de ser reutilizadas [3, 4, 5]. Caretti y Lubello [6] reportan haber obtenido inactivaciones de coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF) del orden de reducción de 3,39-4,76 log para dosis UV entre 110-220 mJ/cm², y que la inactivación total ocurrió para una dosis de UV superior a los 330 mJ/cm², para valores iniciales promedios de 307000 NMP/100ml y 25700 NMP/100ml de CT y CF respectivamente.

Las aguas residuales, después de su tratamiento, pueden ser reutilizadas o aprovechadas para fines beneficiosos y no desperdiciadas. Entre los diversos destinos que pueden darse a las aguas residuales tratadas (ART) se destacan la aplicación sobre terrenos agrícolas y la reutilización en la industria. Desde esta perspectiva, el agua residual una vez tratada puede ser utilizada para el riego de cultivos, irrigación urbana, restauración de ecosistemas, reutilización industrial y recarga a aguas subterráneas [6, 8, 9]. Dependiendo del destino del agua existe un límite máximo permisible para su reuso en riego de cultivo de hortalizas para consumo humano. De acuerdo a las Normas de Calidad de Agua [10], el promedio mensual de CT y CF debe ser menor a 1000 NMP/100 mL de agua y 100 NMP/100 mL de agua respectivamente, correspondientes a las aguas Tipo 2, Sub-Tipo 2A.

El Centro de Investigación del Agua (CIA) de la Universidad del Zulia, posee un sistema experimental de lagunas de oxidación donde se realizan estudios destinados al aprovechamiento de las ART con fines agrícolas, debido a la problemática asociada al uso del agua potable para fines de cultivo [11], dando también respuesta a la disposición de las ART en el Lago de Maracaibo.

Este trabajo tuvo como objetivo diseñar una unidad de desinfección con luz UV desarrollado con materiales de la región para la reutilización de las ART del sistema de lagunas de estabilización de la Universidad del Zulia.

Parte Experimental

Muestras de agua residual

Las muestras de agua residual domestica tratada (ARDT) se recolectaron a la salida de la laguna de maduración del sistema de lagunas de oxidación del CIA, el cual está conformado por tres series de tres lagunas cada una: dos facultativas y una de maduración. Para la caracterización fisicoquímica del agua, se tomaron muestras en envases de plástico de un litro, mientras que para la caracterización microbiológica las muestras fueron tomadas en envases de vidrio de 500 mL.

Para los tratamientos de desinfección con UV las muestras se recolectaron en envases de vidrio estériles de 2,5 L, una vez a la semana por tres meses, los tratamientos se realizaron inmediatamente recolectada el agua, y posteriormente a la exposición de la radiación UV, determinándose los CT y CF.

Para la caracterización fisicoquímica y microbiológica de las muestras de ARDT se consideraron los siguientes parámetros: pH, temperatura, sólidos suspendidos totales (SST) y volátiles (SSV), alcalinidad, conductividad, turbidez, color, fósforo, nitrógeno, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), oxígeno disuelto (OD), CT y CF según lo establecido en los métodos estándar [12]. Cada análisis fue realizado por triplicado.

Equipo experimental

Se construyó una cámara de acero inoxidable, en la cual se instaló una lámpara de luz UV con las siguientes especificaciones: 45 cm de largo por 2,54 cm de ancho, 110/130V y 15W, con longitud de onda en el rango de 100 a 280 nm (luz UV-C). En esta cámara se introdujeron recipientes de vidrios de forma rectangular de 2 L de capacidad, a diferentes tiempos de exposición 180 s, 300 s, 420 y 900 s, y áreas de exposición 416 cm² (A₁), 780 cm² (A₂) y 884 cm² (A₃). El agua se filtró previamente para evitar que sólidos presentes interfirieran en la desinfección. Para definir la profundidad de las bandejas se ensayaron con distintos valores de los mismos debido a la alta turbidez de las ARDT, consiguiéndose que el mejor valor dado por la mayor reducción de la carga bacteriana fuera de 2 cm.

Determinación de microorganismos

Los coliformes totales y fecales se determinaron por la técnica de fermentación de tubos múltiples (número más probable) de acuerdo APHA *et al.* (1998).

Conociendo la carga microbiana de las aguas residuales antes y después del tratamiento con luz UV, se calculó el porcentaje de remoción de microorganismos utilizando la ecuación 1, del mismo modo se calculó el porcentaje de remoción requerido para alcanzar valores de acuerdo a las Normas de Calidad de Agua [10], aguas Tipo 2, Sub-Tipo 2A. Las constantes k y m de la ecuación de desinfección se determinaron con la ecuación 2, con estos valores se obtuvieron las ecuaciones para la desinfección con respecto a CT y CF (Ecuación 3).

$$\% \text{ remoción} = \frac{\text{coliformes iniciales} - \text{coliformes finales}}{\text{coliformes iniciales}} \times 100 \quad (\text{Ec.1})$$

$$\ln I = \ln k - m \ln I \quad (\text{Ec. 2})$$

$$t = \frac{k}{I^m} \quad (\text{Ec.3})$$

Donde: t: tiempo de residencia (s), I: Intensidad de luz UV (mW/cm²), k y m son las constantes de desinfección.

El caudal (Q) se fijó en 16,66 cm³/s, valor recomendado por Calderón [13] para riego de cultivos hidropónicos, y para la velocidad de flujo (V) se tomó 3,33 cm/s, correspondiente a la velocidad mínima para evitar que se depositen sólidos [14]. El área de flujo (A) se calculó utilizando la ecuación 4. Con la ecuación 5, se calculó el ancho (w) del equipo utilizando una altura (h) de altura 2 cm, correspondiente a la profundidad de las bandejas de vidrio utilizadas en las pruebas de radiación UV.

$$Q = V \times A \quad (\text{Ec. 4})$$

$$A = h \times w \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde: A: área de flujo (cm²); h: altura (cm); w: ancho (cm); Q: Caudal (cm³/s)

Posteriormente se calculó la longitud del equipo (L) usando la ecuación 6 y considerando diferentes tiempos de residencia (t):

$$V = \frac{L}{t} \quad (\text{Ec. 6})$$

Con la longitud del equipo y el ancho, se calculó el área de exposición ($A_{\text{exposición}}$) dada por la ecuación 7:

$$A_{\text{exposición}} = L \times w \quad (\text{Ec. 7})$$

Con la ecuación de desinfección (Ec. 3) se calculó la intensidad de la radiación UV, y con la ecuación 8 se determinó la potencia (D) de salida de la lámpara o las lámparas requeridas para el proceso de desinfección.

$$D = I \times t \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde: D = Dosis (mWs/cm²); I = Intensidad de luz UV (mW/cm²); t: tiempo de residencia o exposición (s).

Resultados

La Tabla 1 presenta los resultados de la caracterización del agua a la salida del sistema de lagunas del CIA. Se puede observar que la DQO, DBO, y la carga microbiana (CT) no cumple con los límites permisibles según el Decreto 883, sección III y VI para descarga a cuerpos de agua y suelos, respectivamente [10]. Por otra parte, tampoco pueden ser usadas para el riego de ningún cultivo sin antes recibir un adecuado proceso de desinfección, debido a la alta carga microbiana de las mismas (1,4 10³ NMP/100ml y 1,2 10³ NMP/100ml para CT y CF respectivamente), que superan los límites establecidos para aguas Tipo 2, Sub-Tipo 2A [10].

En investigaciones anteriores en el mismo sistema, los resultados reportados varían respecto a los encontrados en el presente estudio. León [15] reporta valores de 1,6 10⁸ NMP/100ml para CT y 5,0 10⁷ NMP/100ml para CF; Valbuena y col. [16] reportan valores de CT de 4,0 10⁶ NMP/100ml y para CF de 1,0 10⁵ NMP/100ml. Esta variabilidad en la carga microbiológica puede explicarse debido a factores como el funcionamiento del sistema y factores climáticos, indicando la necesidad del control sobre el sistema de lagunas para verificar el cumplimiento de la normativa.

Tabla 1. Caracterización del agua a la salida de las lagunas de oxidación

Parámetro	Valor medio	Desviación estándar	Decreto 883
Temperatura (°C)	22,26	0,049	-
pH	7,87	0,006	6-9
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	245,69	0,227	-
Conductividad (µs/cm)	187,60	0,000	-
Turbidez (NTU)	426,50	0,612	-
Color (UPT/Co)	198,50	0,612	500
SST (mg/L)	8,90	0,000	80
SSV (mg/L)	7,65	0,061	-
Nitrógeno total (mg/L)	8,82	0,171	40
Fósforo (mg/L)	7,31	0,031	10
DQO (mg/L)	361,88	0,811	350
DBO (mg/L)	114,57	0,369	60
OD (mg/L)	0,78	0,012	-
CT (NMP/100 mL)	14x10 ⁴	0,000	1000
CF (NMP/100 mL)	12x10 ⁴	0,000	-

En cuanto a los nutrientes, la concentración media de nitrógeno y fósforo fueron 8,82 mg/L y 7,31 mg/L respectivamente; al comparar estos resultados con los reportados por Quintero *et al* [17] para el mismo sistema (30,5 mg/L y 4,25 mg/L para nitrógeno y fósforo de respectivamente), se observa que la cantidad de nitrógeno es baja y la de fósforo es relativamente alta.

La turbiedad y los SST son parámetros importantes en el proceso de desinfección con UV, debido a que las partículas impiden que la luz UV penetre en todos los puntos del sistema [18]. Los resultados obtenidos (Tabla 1) muestran que la turbidez de las ARDT fue alta (426,50±0,61 UNT). Sin embargo, las concentraciones de SST fueron siempre bajas (8,90 mg/L)

En la Tabla 2 se presentan los resultados de la remoción de CT y CF de las ARDT después de la exposición a radiación UV a diferentes áreas y tiempos de exposición. Se observa que los valores de remoción de CF y CT varían entre 3,7% y 97,88% para los CT, y entre 4,00% y 99,33% para los CF.

Tabla 2. Remoción de coliformes fecales y totales de las aguas residuales tratadas, después de la exposición a radiación UV para diferentes áreas y tiempos de exposición.

Área de exposición (cm ²)	Tiempo de exposición (s.)	Remoción coliformes totales (%)	Remoción coliformes fecales (%)
416	300	3,7	4
416	420	7,41	4,17
416	900	97,88	99,33
780	180	4,35	11,76
780	300	14,29	10
780	420	28,57	20
884	180	2,63	2,7
884	300	6,0	6,25
884	420	8,33	9,76

Partiendo de la carga microbiológica de las ARDT y el requerimiento de la normativa para aguas Tipo 2, Sub-Tipo 2A [10], la remoción de CT y CF se ubicó en 99,92% y 99,29% para CT y CF respectivamente (inactivación de 2,15 Log para CT y 3,08 Log para CF). Con estas premisas, se calcularon los tiempos de exposición requeridos para las áreas establecidas (Tabla 3).

Tabla 3. Tiempo de exposición para el 99,29 % de remoción de coliformes totales y 99,92% de coliformes fecales

Área de exposición (cm ²)	Intensidad (Salida de la lámpara/Área de exposición) mW/cm ²	Tiempo de exposición para coliformes totales (s)	Tiempo de exposición para coliformes fecales (s)
416	36	908	902
780	19	1015	2748
884	17	5105	3503

Con la ecuación 2 y los valores de la Tabla 1, mediante ajuste por mínimos cuadrados, se obtuvo la ecuación de desinfección (Ec. 9 y Ec. 10) aplicable para la inactivación del 99,92% de CT y 99,29% para CF.

$$t = \frac{104002}{I^{1,323}} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$t = \frac{528218}{I^{1,778}} \quad (\text{Ec. 10})$$

Para el dimensionamiento del equipo se tomó en consideración la ecuación de desinfección para CF, por ser la normativa más limitativa. Se calculó el área de flujo usando la ecuación 4, y el ancho del equipo mediante la ecuación 5, obteniéndose los siguientes valores:

$$A_{\text{flujo}} = 5 \text{ cm}^2 \text{ y } w = 2,5 \text{ cm.}$$

Se consideraron varias alternativas de diseño y para ello se utilizaron diferentes tiempos de residencia (240 s, 330 s y 90 s), según ecuaciones 6, 7, 8 y 10, obteniendo variaciones para cada diseño, que se resumen en la Tabla 4.

Tiempo de residencia (s)	Longitud del equipo (cm)	Área de exposición (cm ²)	Intensidad (mW/cm ²)	Potencia de lámpara (W)
240	799,2	1998	76	152
330	1099	2747,5	63	173
90	300	750	132	90

Para definir las medidas adecuadas para el equipo de desinfección se consideraron la relación espacio, tiempo de residencia y cantidad de lámparas a utilizar.

Para el tiempo de residencia de 240 segundos (4 min), se requiere una potencia de salida de 152 W, la cual puede ser alcanzada utilizando 5 lámparas de 30 W, cuyas medidas comprenden 2,54 cm de diámetro y 90,9 cm de longitud, a ser instaladas de manera horizontal en un equipo cuya longitud sea de 799,2 cm, con un ancho de 2,5 cm y una profundidad de 2 cm. No es un equipo grande lo cual permitiría su manejo; sin embargo, el uso de cinco lámparas UV podría resultar costoso, difícil de construir y mantener adecuadamente.

Por otra parte, considerando el tiempo de residencia de 330 segundos (5,5 min), la salida es de 173 W, lo cual implicaría la utilización de 6 lámparas UV de 30 W cada una, de 90,9 cm de longitud y 2,54 cm de diámetro y las medidas del equipo serían 2 cm de profundidad, 2,5 cm de ancho y 1099 cm de longitud. El equipo tiene un tamaño mayor que el anterior y presenta el mismo inconveniente debido a la cantidad de lámparas UV a utilizar, lo cual implica un mayor costo para la adquisición de las mismas y también mayor costo de mantenimiento.

La última opción de diseño se estableció, utilizando un tiempo de residencia de 90 segundos (1,5 min), el cual tiene un requerimiento de potencia de 90 W, la cual se puede alcanzar mediante la utilización de 3 lámparas UV de 30 W cada una. Las medidas del equipo serían 300 cm de longitud, 2,5 cm de ancho y 2 cm de profundidad. Este equipo resulta más pequeño, manejable, tiene un tiempo de residencia fácil de controlar, además utiliza un menor número de lámparas lo cual permite abaratar costos de construcción y de mantenimiento.

Conclusiones

Las características de las aguas residuales a la salida de las lagunas de oxidación, impiden que estas puedan ser descargadas en cuerpos de agua, suelos o subsuelos por la cantidad de materia orgánica que contienen expresada en términos de DQO y DBO; de la misma manera tampoco pueden ser usadas para el riego de ningún cultivo sin antes recibir un adecuado proceso de desinfección, debido a la alta carga microbiana de las mismas

El mejor tiempo de residencia fue de 90 segundos con una potencia de salida de 190 W. La medidas del equipo para que ocurra la desinfección son: 300 cm de longitud, 2,5 cm de ancho y 2 cm de profundidad; ya que presentó la mejor relación, tiempo de residencia, costo de operación, mantenimiento y dimensiones.

El equipo de desinfección maneja un caudal de 16,66 cm³/s., utiliza 3 lámparas UV-C con una potencia de salida de 30 W cada una y cuyas medidas son 90,9 x 2,54 cm. la distancia entre las lámparas UV y la columna de agua debe ser entre 10 y 15 cm, para que la radiación UV pueda penetrar en el cuerpo de agua. El tiempo de residencia requerido para que se dé el proceso de desinfección es de 90 segundos.

Referencias bibliográficas

1. Alcalde L., Folch M., Tapias J., Martínez F., Enguádanos S. y Bernárcer I., Secondary effluent reclamation: combinación of pre-treatment and disinfection technology, *Water Science and Technology*, Vol. 57, Nº 12, (2008), 1963-1968.
2. Arboleda, J., Teoría y práctica de la purificación del agua, Tomo 1, McGraw-Hill Interamericana, S.A. de C.V., 3ª Edición, Colombia. (2000).
3. Liberti L., Notarnicola M., y Petruzzelli D., Advanced treatment for municipal wastewater reuse in agriculture. UV disinfection: parasite removal and by-product formation. *Desalination*, Vol. 152, Nº 1-3, (2003), 315-324.
4. Nardi I., Del Nery V., Amorim A., Dos Santos N y Chimenes F., Performances of SBR, chemi-DAF and UV disinfection for poultry slaughterhouse wastewater reclamation, *Desalination*, Vol. 269, Nº 1-3, (2011). 184-189
5. Montemayor M., Costan A., Lucena F., Jofre J., Munoz J., Dalmau E., Mujeriego R. y Sala L., The combined performance of UV Light and chlorine Turing reclaimend water disinfection, *Water Science and Technology*, Vol 57, Nº 6, (2008), 935-940
6. Caretti C., Lubello C., Wastewater disinfection with PAA and UV combined treatment: a pilot plant study, *Water Research*, Vol. 37, (2003), 2365-2371
7. Hammer, M. J., y Hammer, M. Jr., *Water and wastewater technology*, 4ta. Ed., USA: Prentice-Hall, (2001)
8. León S.G., Procesos de tratamiento de aguas residuales objetivos y selección de tecnologías en función al tipo de reutilización, *V Congreso Venezolano de Ingeniería Agrícola*, Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela, (1995), 315 pp.
9. Isea D., Bello N., Vargas L., Durán J., Yabroudi S. y Delgado J., Acumulación y lixiviación de metales macronutrientes en suelos irrigados con aguas residuales tratadas, *Interciencia*, Vol. 28, No. 12, (2004), 660-666.
10. Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 5021, Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. Extraordinaria, Lunes 18 de diciembre de 1995, Decreto 883, Venezuela, (1995)
11. Centro de Investigación del Agua (CIA)/ Instituto de Investigaciones Petroleras de la Universidad del Zulia (INPELUZ), Caracterización de aguas residuales de las plantas de tratamiento y estudio de calidad para su reutilización con fines de riego [In forme Técnico], Maracaibo (Venezuela), 9 p, (1998)
12. APHA, AWWA, WCF, Standard methods for examination of water and wastewater, 18th Ed., Washington DC, USA, (1998)
13. Calderón F., Estudio los requerimientos nutricionales de un cultivo de tomate, bajo condiciones de invernadero, Bogotá, Colombia (2005)., <http://www.drcalderonlabs.com>, 13/09/2011.
14. Villalobos A. Diseño de drenaje superficial, Costa Rica (2005). Editorial Tecnológica., 32-56.

15. León D., Detección de Enterovirus, Colifagos y Bacterias indicadoras de contaminación en aguas residuales tratadas y no tratadas de un sistema de lagunas de estabilización, Facultad Experimental de Ciencias, Universidad del Zulia. 65 pp, (2000).
16. Valbuena D., Díaz O., Botero L. y Cheng R., Detección de helmintos intestinales y bacterias indicadoras de contaminación en aguas residuales tratadas y no tratadas, *Interciencia*, Vol. 27, Nº 12, (2002), 710-714.
17. Quintero G., Higuera A., Isea D., Vargas L., Blanco E. y Delgado J., Efecto del uso de agua residual tratada y soluciones nutritivas sobre el contenido de nutrientes en frijol *Vigna unguiculata* (L.) Walp cultivado en hidropinial, *Ciencia*, Vol. 13, Nº 3, (2005), 386-401.
18. Beltrán N. y Jiménez B., Eficiencia de la luz ultravioleta para la desinfección de agua residual con alto contenido de patógenos, *Revista Digital Universitaria*, Vol. 1, Nº1, (2001).