

Análisis de interferencia de parámetros físicos del agua, en desinfección por radiación UV

Interference analysis of physical parameters of water in radiation UV disinfection

Pedro Mauricio Acosta Castellanos, Carlos Andrés Caro Camargo, Néstor Rafael Perico Granados

Resumen



Este artículo presenta los resultados de investigación de la evaluación en la eficacia de la remoción de parámetros microbiológicos del agua por medio de radiación ultravioleta. Se hizo mediante ensayos estáticos en un banco de pruebas donde se irradiaron nueve muestras de agua, en las que se variaron las condiciones del medio y del agua. Los parámetros microbiológicos analizados fueron *Escherichia coli*, coliformes totales y mesófilos.

Se analizaron las muestras de agua, a partir de variar de manera controlada sus parámetros físicos, los que influyen en la inactivación, como turbiedad, tiempo de exposición y volumen de agua tratada y concentración microbiológica. Se infirió cuáles son los factores físicos que más tienen influencia en la inactiva-

Abstract



This paper presents the results of evaluation research on the effectiveness of the removal of microbiological parameters water by ultraviolet radiation. It was made by a static test where nine water samples, in which environmental conditions and water were varied irradiated trials. The microbiological parameters analyzed were *Escherichia coli*, total coliforms and mesophilic.

Water samples were analyzed from controllably vary its physical parameters, which influence the inactivation, as turbidity, exposure time and volume of treated water and microbiological concentration. Inferred what physical factors that influence the importance of inactivation and prior to UV disinfection are primary treatments was tested.

Recibido / Received: Enero 27 de 2015 Aprobado / Aproved: Marzo 23 de 2015

Tipo de artículo / Type of paper: Investigación científica y tecnológica terminada

Afiliación Institucional de los autores / Institutional Affiliation of authors: Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, Grupo ACBI

Autor para comunicaciones / Author communications: Néstor Perico Granados, nestor.perico@usantoto.edu.co

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

ción y se comprobó la importancia de tratamientos primarios previos a la desinfección por radiación ultravioleta.

Se construyeron las curvas dosis-respuesta de cada uno de los parámetros microbiológicos y su relación con el parámetro físico analizado. A partir de éstas se determinó la dosificación necesaria para la inactivación. Las muestras de agua fueron analizadas mediante los métodos de número más probable, sustrato definido y recuento en placa.

Palabras clave: Desinfección de agua, E-coli y Radiación ultravioleta.

Dose-response curves of each of the microbiological parameters and their relationship to the physical parameter analyzed were built. From these the dosage required for inactivation was determined. Water samples were analyzed by methods most probable number, defined substrate and plate count.

Keywords: Water disinfection, E - coli , ultraviolet radiation.

Introducción

Las enfermedades de origen hídrico, son un problema latente en América Latina. Generalmente, la morbilidad presentada por efecto del consumo de agua no potable es producto de microorganismos, que están presentes en el agua y en algunos casos puede presentarse incluso la muerte. En Colombia se evalúa el riesgo del agua para ser consumida con un índice de calidad (IRCA). De otro lado, la acción que asegura protección contra el riesgo de infecciones de origen hídrico se denomina desinfección. Este es el tratamiento que debe aplicarse prioritariamente cuando el agua está contaminada, o cuando no puede garantizarse su potabilidad natural de forma permanente [1].

La desinfección se lleva a cabo de diversas maneras, incluyendo métodos físicos y químicos. Uno de los procesos que viene teniendo un relevante aumento en su implementación, en los últimos años, es la desinfección mediante la radiación ultravioleta. El mecanismo de este proceso físico, consiste en utilizar el espectro del rango de luz ultravioleta específicamente el UV-C, en el cual las ondas cortas de la radiación ultravioleta inciden sobre

el material genético de los microorganismos y los virus, y los inactiva sin producir cambios físicos o químicos [2]. Cuando la radiación UV penetra en las paredes de la célula de un organismo, ésta destruye la habilidad de reproducción de la célula. La radiación UV, que es generada por una descarga eléctrica a través de vapor de mercurio, penetra el material genético de los microorganismos y retarda su habilidad de reproducción [3].

Esta investigación buscó explorar la efectividad de este método mediante la determinación de condiciones, en las cuales resulta ser efectivo para la eliminación de agentes microbianos patógenos. Se logró corroborar que la radiación ultravioleta es un método de desinfección eficaz, pero a su vez muy sensible y dependiente de muchos factores externos para su óptimo funcionamiento. Esta investigación evaluó los parámetros que afectan el proceso y las condiciones ideales para el funcionamiento. Según los ensayos realizados y el procesamiento de los datos, los factores que tienen una mayor incidencia en el proceso son: la turbiedad, la calidad del agua, tiempo de exposición y la intensidad de irradiación.

Descripción de la problemática

Colombia presenta varios problemas entorno a la falta de acceso y a la deficiente calidad del agua. En este contexto se estima que cerca de 16 millones y medio de personas en Colombia tienen este inconveniente, es decir cerca del 35% de la población en Colombia [4]. El departamento de Boyacá, Colombia, no es ajeno a este problema puesto que la mayoría de los municipios no poseen sistemas de tratamiento de agua potable adecuados. Según un informe de la secretaria de Salud de Boyacá, de las 13 provincias del departamento, 8 poseen un índice de riesgo a la calidad del agua (IRCA) medio, y las otras 5 se encuentran en riesgo alto. Dentro de éstas últimas se resaltan las provincias de La Libertad y Ricaurte [5].

De la misma manera, muchas personas no cuentan con sistemas de abastecimiento de agua potable en las áreas rurales por diferentes causas, bien sea por que la extensión de la red de acueducto no abarca las zonas o por que no existen fuentes hídricas cercanas que den solución a sus necesidades. Estos aspectos dificultan que las comunidades tengan acceso al agua potable y se vean obligadas a tomar el líquido de fuentes no aptas o contaminadas, hecho que incrementa la problemática debido a que su ingestión pone en alto riesgo la integridad de la población.

Por otro lado, en los lugares donde se realiza el proceso de desinfección al agua potable, se hace por medio de métodos químicos, que en su mayoría de veces no se encuentran en óptimo funcionamiento. Estos procesos adicionalmente pueden llegar a generar altas cargas de subproductos de la desinfección química o SPD, que pueden tener consecuencias en la salud humana debido a una conexión carcinogénica [6].

Por tal razón se decidió estudiar un método de desinfección que reduzca la carga bacteriana del agua y que a su vez no cause efectos secundarios en la población o SPD. Así se decidió, como el método más viable, la desinfección de agua por radiación ultravioleta. Este proyecto plantea una primera etapa, que promueve la eficiencia, la eficacia y la sensibilidad del método de desinfección de agua por radiación ultravioleta. Está propuesto para el agua en condiciones no potables y similares a las encontradas en cuanto a IRCA, en los municipios de Colombia y específicamente en el departamento de Boyacá.

Pruebas de desinfección por radiación UV a muestras inoculadas

Las características del agua para esta investigación fueron acondicionadas a las que tienen generalmente los acueductos rurales y tomas de agua en Colombia. Específicamente se tomó como guía el análisis del IRCA y características microbiológicas de los municipios con IRCA altos, como el del municipio de Santana en Boyacá, Colombia. Éste presentó uno de los mayores índices y condiciones negativos del agua.

Preparación del inóculo inicial

Se tomó agua sin contaminantes microbiológicos y sin cloro residual. Las muestras fueron preparadas para inocularlas con bacterias coliformes, agregando al agua estiércol de ganado bovino, para así tener un cultivo representativo de unidades formadoras de colonias (UFC).

Tabla 1. Análisis microbiológico inóculo inicial

Análisis Microbiológico	Resultado
E. Coli (UFC/100ml)	>8,0
Coliformes Totales (UFC/100ml)	>8,0
Mesófilos (UFC/ml)	20X10 ⁴

Fuente: Autores.

Al agua que se irradiaría se le tomó la medida del potencial de hidrógeno, la turbiedad, la conductividad y la temperatura. También se le hizo la prueba de sólidos sedimentables, por medio del método de cono de Imhoff. Estas medidas se tomaron con el fin de establecer relaciones con la eficiencia de la desinfección por radiación UV.

Determinación de la dosificación de radiación

Para la realización de las pruebas se tomaron como variables la altura de la lámina del agua a irradiar y turbiedad, manteniendo un tiempo de irradiación. Para lograr una

desinfección exitosa, la capacidad del equipo debe ajustarse al requisito de dosis UV del microorganismo que se desea combatir. La eficacia de la radiación es una función directa de la dosis de energía absorbida por el organismo, que se mide como el producto de la intensidad de la lámpara y el tiempo de exposición. La intensidad es la velocidad a la que los fotones son entregados al organismo objetivo [7]. Con las características del tubo de luz ultravioleta se puede determinar la dosificación de radiación.

$$I = \frac{\text{potencia}(mW)}{\text{Área}(cm^2)} \quad (1)$$

Dónde:

I, representa la intensidad (mW/cm²)

P, Potencia de la lámpara (mW)

A, Área de contacto de la lámpara (cm²)

De modo que la dosis será de la siguiente manera:

$$\text{Dosis (mW/cm}^2\text{)} = \text{intensidad (mW/cm}^2\text{)} \times \text{tiempo de exposición (seg)} \quad (2)$$

La fórmula (1), indica que la intensidad de la luz UV depende de las propiedades de la lámpara, área superficial del tubo y potencia eléctrica. En la expresión (2), se observa que la dosificación de la luz UV, es directamente proporcional al tiempo de exposición A mayor tiempo de exposición mayor dosificación y por ende mayor porcentaje de eliminación de microorganismos patógenos [8].

Resultados y analisis

La fase experimental de este proyecto comprendió la ejecución de nueve experimentos de inactivación de las células de E. Coli, Coliformes totales y Mesófilos. Los resultados de la desinfección permitieron evaluar la eficacia de este método. Además los experimentos posibilitaron establecer las condiciones mínimas del agua a tratar, en las que el método de desinfección UV, produce la inactivación de los microorganismos.

A continuación se observaran los resultados obtenidos de las respectivas pruebas de irradiación, evidenciando el comportamiento de la inactivación de patógenos en función de diferentes variables, como el tiempo, la

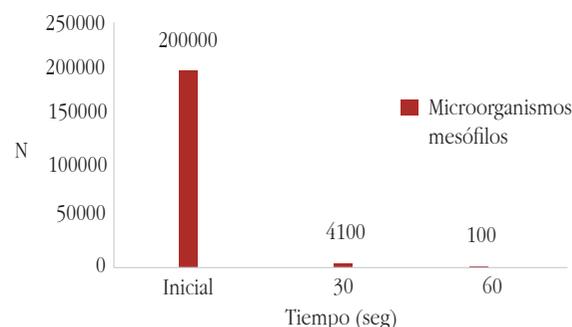
turbiedad, las condiciones de estanqueidad y parámetros físicos del agua.

Pruebas No. 1 y 2 – Variables Turbiedad y Altura de lámina de agua

Se observó que a pesar de la disminución de la turbiedad del agua en 5 UNT, entre la prueba 1 y 2, el número de unidades formadoras de colonias de los coliformes totales no presentó ningún tipo de reducción, lo que indica que los coliformes presentan una mayor resistencia a la desactivación por luz UV. De igual modo ocurre cuando la prueba se realiza variando el volumen irradiado, representado en el cambio de la altura de la lámina de agua, pues los coliformes totales no muestran reducción. Éstos se mantienen en un valor >8,0 UFC/100ml.

Este resultado indica que a mayor volumen de agua irradiada, menor es la inactivación de los microorganismos. Se observa la eficacia de la desinfección UV sobre los microorganismos Mesófilos, los cuales presentan una reducción significativa entre cada prueba.

Figura 1. Inactivación mesófilos– variable Turbiedad (pH= 8.8, T=18,5 °C)



Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta la Ley de Chick de desactivación de microorganismos patógenos en la desinfección, la fracción viable se denota como N/No, donde N es el número de microorganismos vivos obtenidos del análisis por conteo en placa. La expresión N/No, representa el cociente de microorganismos vivos presentes en un determinado tiempo t entre los observados en un tiempo t=0.

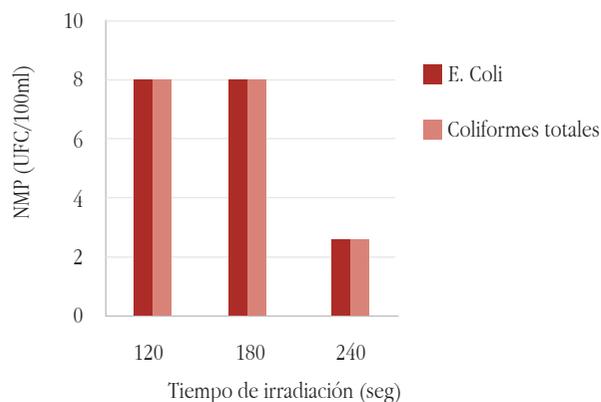
La concentración inicial de 20x10⁴ UFC/100ml al transcurrir la primera irradiación por un lapso de tiempo

de 30 segundos, se presentó en la muestra 16×10^3 UFC/100ml, esto representa una inactivación de 92%. En la siguiente prueba los microorganismos presentes son 6×10^3 UFC/100ml y el remanente en el agua es de 3%. Esto indica que después de 60 segundos de irradiación se logró eliminar 97% de los organismos presentes. Se logró apreciar la inactivación de los Mesófilos en función del tiempo transcurrido de exposición a los rayos de luz UV, en la prueba No. 1 de 30 segundos se logra una reducción de 1 logaritmo. En la prueba No. 2 de 60 segundos la fracción variable muestra una reducción igual, de manera que en total de obtiene eliminación de 10-2 microorganismos o lo que es lo mismo 99%.

Pruebas 3, 4 y 5. Variables tiempo y turbiedad

Los análisis microbiológicos de estas pruebas no son favorables en su totalidad, lo que indica que aún debían ser modificadas las condiciones, hasta alcanzar la eliminación de los patógenos.

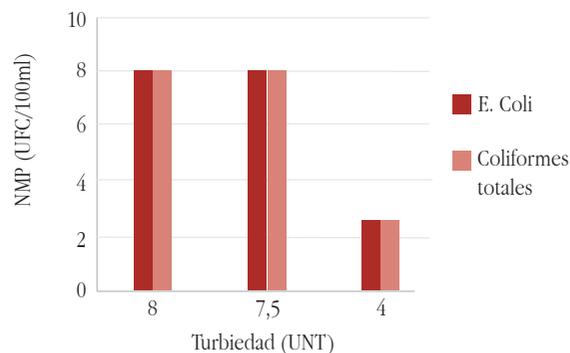
Figura 2. Pruebas 3,4 y 5 – Reducción de *E. Coli* y Coliformes Totales en función del tiempo de irradiación. (PH= 7,8; T=20°C)



Fuente: Autores.

A pesar de que los tiempos de irradiación se aumentaron y por ende la dosificación, en las pruebas No. 3 y 4, no se evidencia ningún efecto de la desinfección. Sin embargo, al aumentar el tiempo de irradiación a 240 segundos es posible observar una notable disminución de dichas unidades de aproximadamente 60% de la carga bacteriana de *E. Coli* y Coliformes totales.

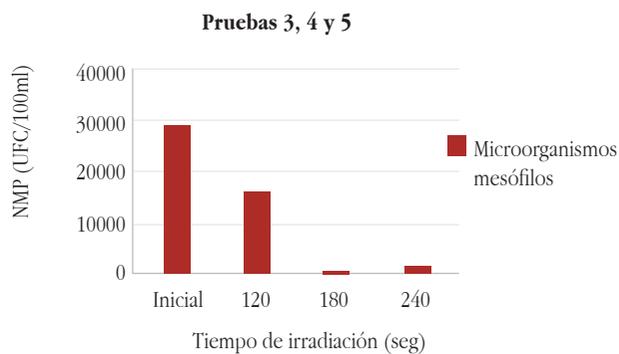
Figura 3. Resultados de las pruebas No. 3, 4 y 5 de inactivación de *E. Coli* y Coliformes Totales con radiación UV en función de la turbiedad.



Fuente: Autores.

Un comportamiento similar se muestra en el gráfico 6, sobre la inactivación en las tres pruebas realizadas. Las No. 3 y 4 no evidenciaron ningún tipo de disminución en la presencia de microorganismos. Esto confirma que el factor que afecta este comportamiento es la alta concentración de bacterias en el inóculo inicial. Por otro lado, en la figura 4 se muestra un resultado favorable en la eliminación de microorganismos Mesófilos.

Figura 4. Resultados de las pruebas No. 3, 4 y 5 de inactivación de mesófilos.



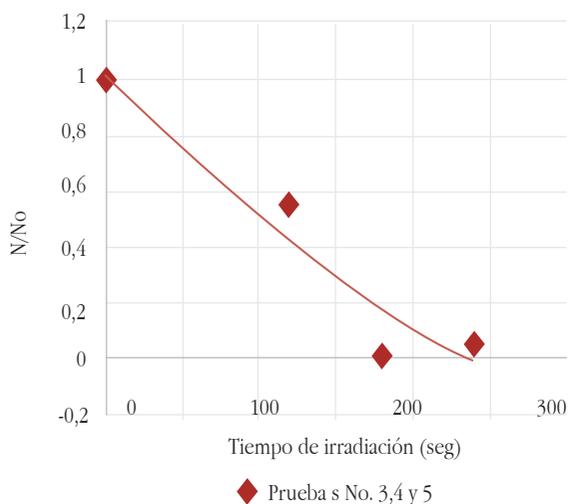
Fuente: Autores.

Al igual que en las pruebas No. 1 y 2 los microorganismos mesófilos presentaron resultados positivos en su inactivación con el aumento del tiempo de irradiación. Se logró notar que se inició con una cantidad de microorganismos mesófilos de 29×10^3 UFC/100ml. Sin embargo, al transcurrir 120 segundos de exposición a la radiación

UV, ya se obtenía una inactivación de 44,9%, el resultado de N/No es de 0,551, lo que indica que aun el 55,1% de microorganismos estaban presentes en el tanque. Al cabo de 180 segundos la inactivación aumentó a 75,7%, ya que la relación N/No tenía un valor de 0,206. Finalmente, para la última prueba se presentó una inactivación límite del 81,7% al trascurso de un tiempo de 60 segundos, la muestra en ese momento conservo el 18,3% de microorganismos, esto representa que el tiempo y la dosis de irradiación no son suficientes para la obtención de resultados adecuados en la desinfección.

En la figura 5 se evidencia la inactivación de mesófilos en función del tiempo. Se obtuvo una inactivación en un rango de tiempo de irradiación de 0-180, de 2 logaritmos.

Figura 5. Inactivación de mesófilos con radiación UV. Pruebas 3,4 y 5. (PH= 7,3; T=17,3)



Fuente: autores

Se evidencia en la Gráfica 12., la eficiencia final de la desinfección de agua por medio de radiación ultravioleta para microorganismos mesófilos. El parámetro N/No toma su valor mínimo en la reducción de 3 logaritmos con un tiempo de exposición de 300 segundos.

Construcción de la curva Dosis – Respuesta.

Esta curva es útil no solo para determinar la dosis mínima de radiación efectiva para diferentes microorganismos, sino que también se puede usar para obtener la menor

calidad de agua esperada. En la Tabla 2 se muestra el tiempo de irradiación, la dosificación en cada prueba para E. Coli y la respectiva inactivación en NMP de UFC/100ml.

Tabla 2. Dosificación de luz ultravioleta irradiada en cada prueba para e. Coli

Prueba No.	Tiempo (seg)	Dosis mWs/cm ²	NMP (UFC/100ml)
1	30	1039,2	8
2	60	2078,4	4,6
3	120	4156,8	8
4	180	6235,2	8
5	240	8313,6	2,6
6	270	9352,8	<1,1
7	300	10392	<1,1

Fuente: autores

De igual manera en la Tabla 3, se observan los parámetros de tiempo, dosis e inactivación en NMP de UFC/100ml.

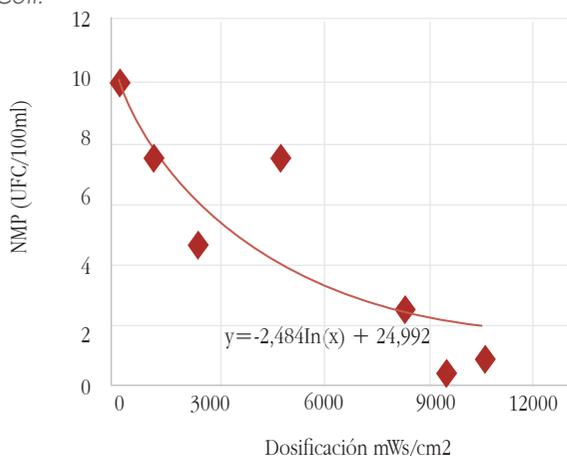
Tabla 3. Dosificación de luz ultravioleta irradiada en cada prueba para coliformes totales.

Prueba No.	Tiempo (seg)	Dosis mWs/cm ²	NMP (UFC/100ml)
1	30	1039,2	8,0
2	60	2078,4	8,0
3	120	4156,8	8,0
4	180	6235,2	8,0
5	240	8313,6	2,6
6	270	9352,8	8,0
7	300	10392	<1,1

Fuente: Autores.

A continuación se presenta la curva Dosis- Respuesta hallada con base en los resultados obtenidos en cada una de las pruebas de irradiación. El comportamiento de la gráfica es de tipo logarítmico. La dosis hallada para la eliminación de las bacterias es de 9.352,8 mWs/cm².

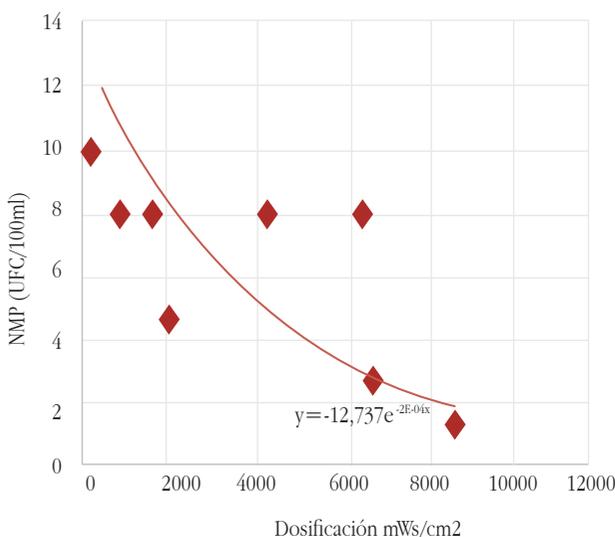
Figura 7. Curva Dosis – Respuesta para la bacteria E. Coli.



Fuente: Autores.

En la Gráfica 14 se representa la curva Dosis – Respuesta de los coliformes totales, los cuales arrojaron resultados de eliminación total en un lapso más largo que la bacteria E. Coli. Así mismo, la dosis requerida para la eliminación de estos coliformes es 10.392 mWs/cm².

Figura 8. Curva Dosis-Respuesta para Coliformes Totales



Fuente: Autores.

En comparación de la E. Coli y Coliformes Totales de los resultados de las 7 pruebas realizadas en distintas condiciones, se observa que aunque la mayoría de los valores

son iguales, los coliformes totales tardaron un tiempo más en reducir su concentración y por ende se requiere una dosificación más alta que el E. Coli.

Conclusiones

El rango de longitud de onda que se considera germicida es el UV-C, que comprende valores de 200-280 nm, para este caso específico la longitud de onda óptima fue de 253,7 nm.

La turbiedad es un parámetro influyente en la desinfección de agua por medio de UV. Se logró comprobar que a medida que se incrementa la turbiedad del agua, es menor la inactivación. Esto se debe que las partículas que causan dicha turbiedad actúan como escudo para los microorganismos, evitando que el haz de luz UV produzca la inactivación. Este parámetro está ligado íntimamente al valor de los sólidos suspendidos, por tal motivo es imprescindible que se utilice el sistema de desinfección por UV, con método como la filtración que disminuya la cantidad de sólidos suspendidos.

El tiempo mínimo de exposición para poder alcanzar la inactivación de los microorganismos es de 300 segundos durante los cuales, con una intensidad de 34,64 mWs/cm². Se lograron obtener valores menores a 1,1 UFC/100ml de E. Coli y Coliformes totales y menor a 100UFC/ml de microorganismos mesófilos.

La dosificación determinada efectiva en la desinfección depende del microorganismo objeto de estudio, dado que no todos los agentes patógenos reaccionan igual manera ante los efectos de la luz UV. Se logró establecer que el E. Coli reacciona ante un menor tiempo comparado con coliformes totales.

Se logró comprobar que en cargas altas como la del inoculo inicial con E. Coli >8,0 (UFC/100ml), Coliformes Totales >8,0 (UFC/100ml) y Mesofilos 20X10⁴ (UFC/ml), el proceso de desinfección mediante UV, no es eficiente aun en exposiciones mayores a los 300 segundos.

Una de las mayores ventajas de este método es que luego de terminado el proceso no deja residuales en el agua que combinados con otros compuestos lleguen a ser perjudiciales para la salud de quienes la consuman, a diferencia de los métodos usados comúnmente como la cloración que tienen subproductos de la desinfección (SPD), mencionadas.

Referencias

- [1] [1] Organización panamericana de la salud. “desinfección del agua”, Washington, 2006, pp. 5.
- [2] Z, Delgado, “Análisis, diseño y construcción de reactores a escala para desinfección de agua potable por radiación UV”, Universidad de las Américas, Puebla, México, 2005, pp. 7.
- [3] United states enviromental protection agency. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales, desinfección con luz ultravioleta. 1999, pp. 1.
- [4] Defensoría del Pueblo, “Diagnostico sobre la calidad del agua para el consumo humano en Colombia, en el marco del derecho humano al agua”, Informe defensorial No. 39-B, 2007, pp. 35.
- [5] Gobernación de Boyacá, Secretaria De Salud. Boletín Análisis Situacional de salud en Boyacá. 2011, pp. 25.
- [6] C. Delgado, C. Fall, “agua potable para comunidades rurales, reusó y tratamientos avanzados de aguas residuales domesticas”. Red Iberoamérica de potabilización y depuración de agua. 2003, pp. 118.
- [7] J. Lehr, J. Keeley, “wáter disinfection using UV radiation, a Sri Lankan expierence“ Water Encyclopedia, University of Moratuwa, Moratuwa, Sri Lanka, 2005, pp.471.
- [8] Z, Delgado, “Análisis, diseño y construcción de reactores a escala para desinfección de agua potable por radiación UV”, Universidad de las Américas, Puebla, México, 2005, pp. 112.

Los Autores



Pedro Mauricio Acosta Castellanos

pedro.acosta@usantoto.edu.co

Mg. en Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Esp. en Ingeniería Sanitaria y Ambiente, Esp. En comportamiento y conservación del recurso hídrico. Ingeniero Civil, Investigador Grupo ACBI, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja



Carlos Andrés Caro Camargo

decano.civil@ustatunja.edu.co

Ph.D(C) en Ingeniería, Magister en Ingeniería Civil con énfasis en recursos hídricos y ambientales. Investigador Facultad de Ingeniería Civil Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, Grupo ACBI.



Néstor Rafael Perico Granados

nestor.perico@usantoto.edu.co

Ph.D(C) en Educación, Magister en Educación, Ingeniero civil, Investigador Facultad de Ingeniería Civil Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, Grupo ACBI.