

ppi 201502ZU4659

Esta publicación científica en formato digital es
continuidad de la revista impresa

ISSN 0254 -0770 / e-ISSN 2477-9377 / Depósito legal pp 197802ZU38



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



REVISTA TÉCNICA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA




VOLUMEN 46

EDICIÓN CONTINUA

AÑO 2023

Dr. Ignacio Rodríguez Iturbe - Zuliano ilustre
Ingeniero civil, hidrólogo profesor universitario,
doctor honoris causa de la Universidad del Zulia,
ciudadano ejemplar con numerosos premios nacionales e internacionales.

Eficiencia de la Cloración como Proceso de Desinfección de Aguas Municipales Tratadas en un Sistema Biológico Combinado Anaeróbico-Aeróbico

Nancy Angulo^{1*}, Yesenia Dávila¹, Ismenia Araujo¹, Julio Marín²

¹Centro de Investigación del Agua (CIA), Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo 4011, Venezuela.

²Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA), Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo 4011, Venezuela.

*Autor de correspondencia: nancyangulo71@gmail.com

<https://doi.org/10.22209/rt.v46a17>

Recepción: 09 de octubre de 2023 | Aceptación: 14 de diciembre de 2023 | Publicación: 27 de diciembre de 2023

Resumen

En vista de los problemas que enfrenta la humanidad debido a la escasez de agua, la reutilización de aguas residuales tratadas surge como alternativa para disponer de agua para diversos usos. En esta investigación se evaluó la eficiencia de la desinfección con cloro en aguas residuales municipales tratadas por un sistema biológico combinado anaeróbico-aeróbico. Para ello, se aplicaron seis tratamientos diferentes (T), considerando el tiempo de contacto (20 y 30 min) y la dosis (10, 30 y 40 mg/l). La densidad de bacterias coliformes totales (BCT) y fecales (BCF) en el agua tratada fue de $2,8 \times 10^8$ NMP/100 ml, para ambos parámetros, lográndose una disminución hasta $4,10 \times 10^3$; $3,00 \times 10^2$ y $2,40 \times 10^2$ NMP/100 ml para BCT y hasta $2,10 \times 10^1$; $2,20 \times 10^2$ y $2,30 \times 10^2$ NMP/100 ml para BCF, con los tratamientos T4 (30 mg/l y 30 min), T5 (40 mg/l y 20 min) y T6 (40 mg/l y 30 min), respectivamente, para remociones superiores al 99,9%. Estos niveles de bacterias cumplen con los límites permisibles de la normativa nacional para aguas destinadas al riego de cualquier tipo de cultivo (excepto vegetales para consumo humano) y uso pecuario. Los procesos de desinfección con cloro son una alternativa eficiente en el acondicionamiento de aguas residuales tratadas.

Palabras clave: cloro; coliformes fecales; coliformes totales; desinfección; postratamiento.

Efficiency of Chlorination as a Disinfection Process for Municipal Water Treated in a Combined Anaerobic-Aerobic Biological System

Abstract

Humanity faces serious problems due to water scarcity, and the reuse of treated wastewaters is a viable alternative to have water for various uses, including irrigation. In this research, the efficiency of chlorine disinfection in municipal wastewaters treated by a combined anaerobic-aerobic biological system was evaluated. For this, six different treatments (T) were applied, considering the contact time (20 and 30 min) and the dose (10, 30 and 40 mg/l). The density of total (TCB) and fecal (FCB) coliform bacteria before disinfection of the treated water was 2.8×10^8 MPN/100 ml, for both parameters, achieving a decrease to 4.10×10^3 , 3.00×10^2 and 2.40×10^2 MPN/100 ml TCB and to 2.10×10^1 , 2.20×10^2 and 2.30×10^2 MPN/100 ml FCB with treatments T4 (30 mg/l and 30 min), T5 (40 mg/l and 20 min) and T6 (40 mg/l and 30 min), respectively, resulting in removals greater than 99.9%. These levels of bacteria comply with permissible limits of national regulations for water intended for irrigation

of crops (except vegetables for human consumption) and livestock use. Chlorine disinfection processes are an efficient alternative in the conditioning of treated wastewaters.

Keywords: chlorine; disinfection; fecal coliforms; posttreatment; total coliforms.

Efficiência da Cloração como Processo de Desinfecção para Água Tratada Municipalmente em um Sistema Biológico Combinado Anaeróbico-Aeróbico

Resumo

Diante dos desafios enfrentados pela humanidade devido à escassez de água, a reutilização de águas residuais tratadas surge como uma alternativa para diversos fins. Esta pesquisa avaliou a eficiência da desinfecção com cloro em águas residuais tratadas municipalmente por meio de um sistema biológico combinado anaeróbico-aeróbico. Foram aplicados cinco tratamentos diferentes (T), considerando o tempo de contato (20 e 30 minutos) e a dosagem (10, 30 e 40 mg/l). As densidades de bactérias coliformes totais (BCT) e coliformes fecais (BCF) antes da desinfecção da água tratada foram de $2,8 \times 10^8$ NMP/100 ml para ambos os parâmetros, alcançando uma redução para $4,10 \times 10^3$; $3,00 \times 10^2$; e $2,40 \times 10^2$ NMP/100 ml e $2,10 \times 10^1$; $2,20 \times 10^2$; e $2,30 \times 10^2$ NMP/100 ml com T4 (30 mg/l e 30 min), T5 (40 mg/l e 20 min) e T6 (40 mg/l e 30 min), respectivamente, após a aplicação do tratamento com cloro, resultando em taxas de remoção superiores a 99,9%. Esses níveis de bactérias estão de acordo com os limites permitidos nas regulamentações nacionais para água destinada à irrigação de qualquer tipo de cultura (exceto vegetais para consumo humano) e uso pecuário. Os processos de desinfecção com cloro provam ser uma alternativa eficiente no condicionamento de águas residuais, possibilitando sua reutilização para diversos fins.

Palavras-chave: cloro; coliformes fecais; coliformes totais; cuidados posteriores; desinfecção.

Introducción

La escasez de agua es un problema a escala mundial que ha afectado a la humanidad a través de los años, debido a la baja disponibilidad de recursos hídricos y dificultad de acceso en muchas regiones del planeta (Li, 2023). De esta manera, desde hace muchos años, ha surgido la posibilidad de aprovechar económicamente las aguas residuales, promoviendo internacionalmente el reúso controlado para diversos fines, además de la necesidad de proteger nuestro entorno (Hristov *et al.*, 2021). Debido al peligro que estas aguas puedan representar, tanto para la salud humana como para el ambiente en general, dichos tratamientos se abocan a la eliminación de microorganismos patógenos y sustancias que pueden ser tóxicas, a fin de evitar que logren alcanzar los cuerpos de aguas naturales, alterando así el equilibrio de los ecosistemas acuáticos. Como respuesta a estas preocupaciones, la desinfección se ha convertido en uno de los mecanismos principales para la desactivación o destrucción de los organismos patógenos (Amin *et al.*, 2013).

La desinfección con cloro se utiliza para eliminar microorganismos en aguas residuales y potables, por su bajo costo, facilidad de adquisición y efectividad comprobada. El cloro es el desinfectante más usado para el tratamiento del agua residual doméstica porque destruye los organismos al ser inactivados mediante la oxidación del material celular. El cloro puede ser suministrado en muchas formas que incluyen el gas de cloro, soluciones de hipoclorito y otros compuestos clorinados en forma sólida o líquida (Werkneh e Islam, 2023; Islami *et al.*, 2019). Es por ello que, el objetivo de esta investigación consistió en evaluar la eficiencia de la desinfección con cloro de aguas municipales tratadas en un sistema biológico combinado anaeróbico-aeróbico. Las densidades finales de bacterias coliformes fueron contrastadas con los límites permisibles de normativas nacionales e internacionales, para vislumbrar el posible reúso agrícola del efluente desinfectado.

Materiales y Métodos

Agua residual municipal tratada

Para esta investigación se usó el efluente de un sistema de tratamiento biológico alimentado con agua residual doméstica, procedente del colector C de la red de recolección de aguas municipales de la zona norte de la ciudad de Maracaibo, Venezuela. Dicho tratamiento biológico estaba constituido, por (disposición en serie): un reactor anaeróbico de doble cámara, una cascada de aireación y un filtro biológico, instalados en las adyacencias del laboratorio a la intemperie. Para la caracterización fisicoquímica del efluente proveniente del filtro biológico, se realizó la captación de manera manual, a través de un muestreo aleatorio simple en recipientes de vidrio con capacidad de 500 ml, limpios y con tapa. Para los análisis microbiológicos, se recolectaron muestras de manera aséptica en frascos de vidrio estériles de 125 ml con tapa de baquelita. Los muestreos se realizaron cada 15 días durante un periodo de tres meses, para un total de 6 muestras.

En las muestras se determinaron las características fisicoquímicas y microbiológicas, de acuerdo con los métodos estandarizados (APHA *et al.*, 2017), con los siguientes parámetros: pH (método potenciométrico), sólidos suspendidos totales – SST (método gravimétrico), turbidez (método nefelométrico), color aparente (método de comparación visual), bacterias coliformes totales – BCT (técnica de fermentación en tubos múltiples) y bacterias coliformes fecales – BCF (técnica de fermentación en tubos múltiples). Los resultados de estas variables fueron tratados estadísticamente utilizando el programa Microsoft Excel 2010, estimando los valores de tendencia central (media aritmética) y su dispersión (desviación estándar).

Tratamiento de desinfección mediante cloración

Para los ensayos de desinfección con cloro, de igual manera se capturaron muestras de 5 l del efluente del filtro biológico en recipientes de polietileno de alta densidad (PAD) estériles. En el laboratorio, se realizó la dosificación de cloro directamente en los recipientes de PAD y se mezcló manualmente para lograr una homogenización completa, dejándolos en reposo hasta transcurrir el tiempo de contacto establecido. Inmediatamente después, se realizaron los análisis fisicoquímicos y microbiológicos mencionados anteriormente. Para el proceso de desinfección se establecieron 6 tratamientos (T) diferentes, a partir de la determinación de la demanda de cloro del efluente (método de supercloración: adición de cloro, tiempo de contacto de 20 min y análisis de cloro residual), considerando el tiempo de contacto (20 y 30 min) y la dosis de cloro (10, 30 y 40 mg/l), de acuerdo con la Tabla 1. Para ello, se utilizó una solución comercial de hipoclorito de sodio, sobre la que se analizó la concentración de cloro por el método iodométrico estándar (APHA *et al.*, 2017). Finalmente, se calcularon las medias y desviaciones estándares de los parámetros y se realizó un análisis de varianza (con prueba de separación de medias – prueba de Tukey), mediante la utilización del programa SPSS versión 20.0, con la finalidad de determinar si existían diferencias significativas en los porcentajes de remoción de los parámetros microbiológicos entre los seis tratamientos establecidos.

Tabla 1. Dosis y tiempos de contacto aplicados al efluente tratado en el sistema biológico.

Tratamiento	Dosis de cloro* (mg/l)	Tiempo de exposición (min)	Número de muestras
T1	10	20	3
T2	10	30	3
T3	30	20	3
T4	30	30	3
T5	40	20	3
T6	40	30	3

*: a partir de una solución comercial de hipoclorito de sodio.

Resultados y Discusión

Características del agua residual municipal tratada en el sistema biológico

Con relación a los parámetros fisicoquímicos (Tabla 2), el valor medio de pH ($7,67 \pm 0,11$) se encontró dentro de los límites permisibles para la reutilización de aguas residuales tratadas en el sector agrícola establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. – USEPA (Soderberg, 2016), los cuales varían entre 6 y 9 unidades de pH. Este valor es característico de las aguas residuales domésticas tratadas mediante tratamientos primarios (Gil y Crespo, 2013). Para SST se encontró un valor medio de $28,0 \pm 3,8$ mg/l, coincidiendo con lo establecido por la USEPA (Soderberg, 2016) para este tipo de aguas (≤ 30 mg/l); estos niveles permiten una mayor eficiencia en la aplicación de tratamientos complementarios (Valencia *et al.*, 2012). En el caso de la turbidez y el color, se obtuvieron valores medios de $95,66 \pm 16,27$ UNT y 588 ± 102 UC Pt-Co, respectivamente, para los que la normativa nacional e internacional no establece límites de referencia (Tabla 2). Sin embargo, Rojas Higuera *et al.* (2010) reporta que valores altos de color y turbidez son propios en muestras de aguas residuales que no han tenido un tratamiento complementario.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua municipal obtenida a la salida del tratamiento biológico.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Media	DE	Límite permisible
pH	7,49	7,77	7,67	0,11	6-9 *
SST (mg/l)	24,1	34,3	28,0	3,8	≤ 30 *
Turbidez (UNT)	64,18	110,06	95,66	16,27	-
Color (UC Pt-Co)	394	685	588	102	-
BCT (NMP/100 ml)	$3,00 \times 10^5$	$1,60 \times 10^9$	$2,80 \times 10^8$	$6,50 \times 10^8$	5000 **
BCF (NMP/100 ml)	$3,00 \times 10^5$	$1,60 \times 10^9$	$2,80 \times 10^8$	$6,50 \times 10^8$	1000 **

DE: desviación estándar, SST: sólidos suspendidos totales, BCT: bacterias coliformes totales, BCF: bacterias coliformes fecales, *: según la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. (USEPA) para la reutilización de aguas residuales tratadas en el sector agrícola (Soderberg, 2016), **: para agua destinada al riego de cualquier tipo de cultivo (excepto vegetales para consumo humano) y uso pecuario (subtipo 2B) (Decreto 883, 1995), -: no incluido, n= 6, n: número de mediciones realizadas.

En la determinación de los parámetros microbiológicos, BCT y BCF, se detectaron niveles iniciales de $2,8 \times 10^8$ NMP/100 ml en ambos casos (Tabla 2). Este valor supera el límite permitido por la legislación nacional para el agua destinada al riego de cualquier tipo de cultivo (excepto vegetales para consumo humano) y uso pecuario (subtipo 2B) (Decreto 883, 1995); no obstante, es característico de este tipo de efluentes (Gordillo de Coss, 2013; Rojas Higuera *et al.*, 2010). La cantidad de bacterias coliformes encontrados permiten clasificar al efluente como de “concentración baja” (entre 10^6 y 10^7), de acuerdo al criterio de Metcalf y Eddy (2003), lo cual resulta congruente con su origen. De manera general, estos resultados justifican la necesidad de aplicar tratamientos complementarios para la eliminación completa de los microorganismos patógenos, pudiéndose obtener un efluente que cumpla con los requerimientos establecidos para ciertos usos.

Eficiencia del proceso de cloración en las aguas municipales tratadas

En la Tabla 3 se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos: pH, SST, turbidez y color, los cuales fueron monitoreados como medida de control del proceso de cloración. Los valores de pH luego de la cloración estuvieron dentro de la escala de neutralidad (7,50-7,74) y del rango normativo especificado para la reutilización de aguas residuales tratadas en el sector agrícola de la USEPA (6-9) (Soderberg, 2016); también fue característica la poca variación de los niveles de pH antes y después de la cloración (inicial y final). El pH del agua es un factor influyente en el agua de riego, su importancia radica en que afecta la solubilidad, fijación de los metales y alcalinidad de los suelos, interfiriendo con la nutrición de la planta (Tartabull Puñales y Betancourt Aguilar, 2016). Por su parte, el contenido de SST en los tratamientos osciló entre 18,4 y 31,1 mg/l; valores que, en general, cumplen con el máximo permisible de la USEPA de ≤ 30 mg/l (Soderberg, 2016), solo excedido en T6. El color y la turbidez en los tratamientos de cloración variaron entre 394-685 UC Pt-Co y 64,40-110,22 UNT, respectivamente, con una tendencia a aumentar entre los tratamientos, desde T1 hasta T6, lo que pudo estar relacionado con la presencia de ciertos tipos de sólidos o partículas coloidales, que tienden a aumentar durante los

procesos de cloración de aguas residuales (Ghernaouta, 2017; USEPA, 1999), aun cuando no se detectó su presencia en el análisis de SST.

Con relación a los parámetros microbiológicos (Figura 1a), mediante la cloración se consiguió la reducción de la densidad poblacional de BCT en 4, 5 y 7 unidades logarítmicas (Ulog) en T4 (30 mg/l y 30 min), T5 (40 mg/l y 20 min) y T6 (40 mg/l y 30 min), para niveles finales de $4,10 \times 10^3$; $3,00 \times 10^2$ y $2,40 \times 10^2$ NMP/100 ml, respectivamente, con diferencias significativas ($p < 0,05$), de acuerdo con la prueba de Tukey, respecto a T2 y T3, y representando remociones superiores al 99,9 %. Al respecto, la normativa venezolana establece para el agua subtipo 2B (destinada al riego de cualquier tipo de cultivo (excepto vegetales para consumo humano) y uso pecuario), un límite permisible de 5000 NMP por cada 100 ml para BCT (Decreto 883, 1995), con el que se logró cumplir en estos tres tratamientos. De igual forma, se observaron reducciones de la densidad poblacional de BCF en el orden de 6, 5 y 7 Ulog para T4, T5 y T6 (Figura 1b), con valores finales de $2,10 \times 10^1$; $2,20 \times 10^2$ y $2,30 \times 10^2$ NMP/100 ml, respectivamente, representando diferencias significativas ($p < 0,05$), según la prueba de Tukey, con relación a T1, T2 y T3. Estas densidades finales de BCF cumplieron con el límite máximo de la legislación nacional para el agua subtipo 2B de 1000 NMP por cada 100 ml (Decreto 883, 1995), representando remociones superiores al 99,9 %. En referencia a estas variables microbiológicas, Jiménez (2001) reportó la remoción de BCF en 8 Ulog (desde $1,2 \times 10^9$ hasta $5,8 \times 10^1$ NMP CF/100 ml), utilizando una concentración de cloro de 12 mg/l y un tiempo de contacto de 3 horas, que resulta mayor al utilizado en la presente investigación. En vista de estos resultados, T4 sería el tratamiento más adecuado, considerando los aspectos económicos, debido a que se usa menor cantidad de cloro (30 mg/l) respecto a T5 y T6 (40 mg/l).

Tabla 3. Resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos en los tratamientos de desinfección con cloro del agua municipal tratada biológicamente.

Parámetro		Tratamiento					
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
pH	MI	7,43	7,62	7,40	7,41	7,30	7,62
	MF-M	7,60	7,70	7,50	7,62	7,73	7,74
	MF-DE	0,08	0,11	0,04	0,05	0,06	0,06
SST (mg/l)	MI	24,1	24,2	28,0	28,3	24,0	34,1
	MF	27,4	18,4	24,2	27,0	20,2	31,1
	MF-DE	3,1	3,5	2,0	1,2	1,2	2,0
Turbidez (UNT)	MI	38,77	100,61	62,93	62,93	58,70	56,14
	MF-M	64,40	110,22	98,20	94,43	101,32	106,30
	MF-DE	2,99	4,31	2,84	1,65	1,59	2,96
Color (UC Pt-Co)	MI	228	632	409	409	365	375
	MF-M	394	649	564	592	627	685
	MF-DE	26	15	52	3	3	8

SST: sólidos suspendidos totales, T1: 10 mg/l – 20 min, T2: 10 mg/l – 30 min, T3: 30 mg/l – 20 min, T4: 30 mg/l – 30 min, T5: 40 mg/l – 20 min, T6: 40 mg/l – 30 min, n= 3, n: número de mediciones realizadas, MI: muestra inicial, MF: muestra final, M: media aritmética, DE: desviación estándar, n= 3, n: número de mediciones realizadas.

En T1, T2 y T3 solo se consiguió eliminar entre 1 y 2 Ulog de BCT y BCF, lo que permite inferir que las dosis de cloro aplicadas fueron insuficientes para obtener un residual de cloro libre que inactivara a los microorganismos presentes en las muestras, lo cual difiere de los ensayos realizados por Valencia *et al.* (2012) y Gordillo de Coss (2013), quienes obtuvieron remociones de 4 Ulog para BCT al aplicar 10 mg/l de cloro (menor a las usadas en este trabajo) y un tiempo de contacto de 30 min; lo que también depende de la presencia de ciertas sustancias con demandas de cloro apreciables que pueden consumir el cloro disponible en reacciones colaterales, incidiendo directamente sobre la disponibilidad de cloro libre, resultando en una demanda superior para lograr una desinfección adecuada (Ghernaouta, 2017; USEPA, 1999). En adición, Metcalf y Eddy (2003) sostienen que el tiempo de contacto requerido puede oscilar entre 15 y 45 min, y que la presencia de turbidez interfiere con la desinfección debido a la presencia de partículas en el medio que protegen físicamente a los microorganismos del contacto directo con el desinfectante.

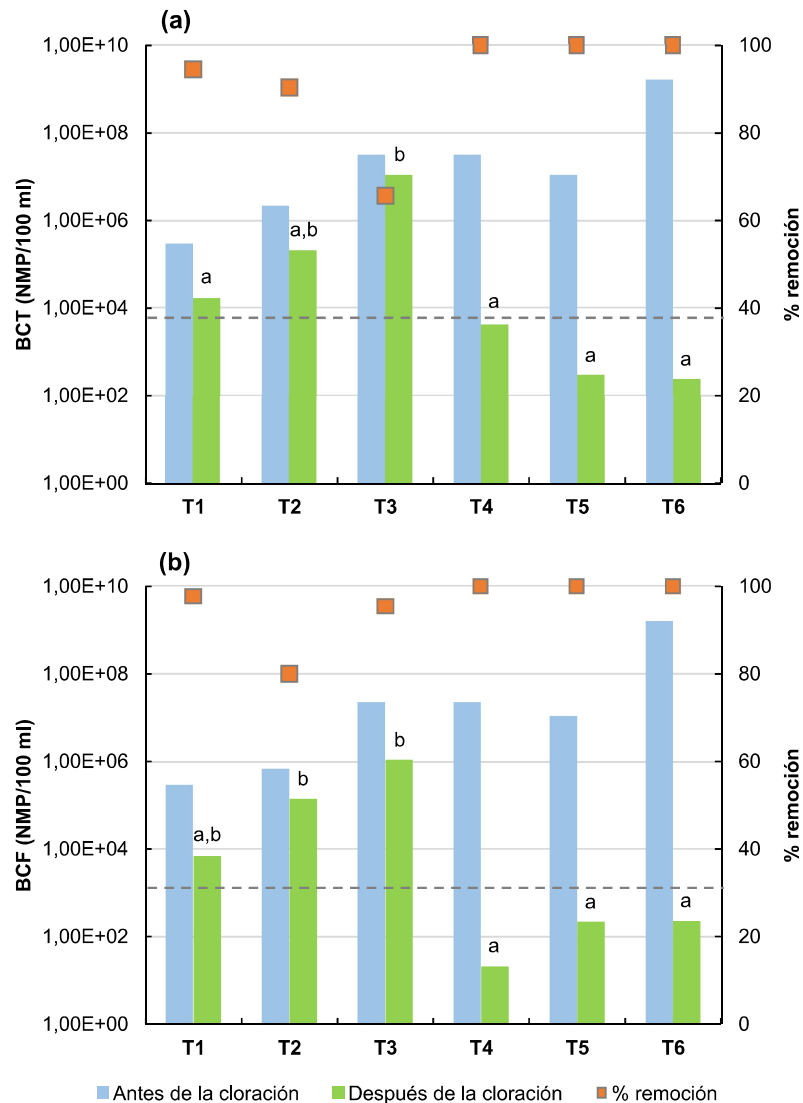


Figura 1. Densidad poblacional de bacterias coliformes totales (a: BCT) y fecales (b: BCF) en los tratamientos con cloración. Letras diferentes para una misma variable indican diferencias significativas ($p < 0,05$), según la prueba de Tukey; T1: 10 mg/l – 20 min; T2: 10 mg/l – 30 min; T3: 30 mg/l – 20 min; T4: 30 mg/l – 30 min; T5: 40 mg/l – 20 min; T6: 40 mg/l – 30 min, $n = 3$, n : número de mediciones realizadas. Límites permisibles para agua subtipo 2B (línea segmentada): 5000 NMP/ 100 ml para BCT y 1000 NMP/100 ml para BCF (Decreto 883, 1995).

Conclusiones

La caracterización de las aguas municipales resultantes del tratamiento biológico develó que los parámetros microbiológicos, BCT y BCF, excedían los límites permisibles de la legislación nacional para agua destinada al riego de cualquier tipo de cultivo (excepto vegetales para consumo humano) y uso pecuario (subtipo 2B), lo que justificó la aplicación de un proceso de desinfección para su posible reúso. Los tratamientos de desinfección resultaron eficientes en el acondicionamiento de las aguas residuales tratadas biológicamente, al utilizar dosis de 30-40 mg/l de cloro con tiempo de contacto de 20-30 min (T4, T5 y T6), en los cuales se logró remover > 99,9 % de las bacterias coliformes presentes, cumpliendo con los requerimientos de la normativa para riego (subtipo 2B). Considerando los aspectos económicos, se recomiendan las condiciones de cloración de T4 para el mencionado efluente, ya que requiere una menor cantidad de cloro.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación del Agua (CIA) y al Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA) de la Facultad de Ingeniería, por el cofinanciamiento y la infraestructura prestada para la realización de esta investigación, así como al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CONDES-LUZ) por el financiamiento del proyecto N° CC-0153-17.

Referencias Bibliográficas

- Amin, M. M., Hashemi, H., Bovini, A. M., Hung, Y. T. (2013). A review on wastewater disinfection. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 2(1), 22.
- APHA, AWWA, WEF. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23rd edition. Washington: American Public Health Association.
- Decreto 883. (1995). *Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos*. Gaceta Oficial No 5021. Caracas: Presidencia de la República de Venezuela.
- Gheraouta, D. (2017). Water treatment chlorination: an updated mechanistic insight review. *Chemistry Research Journal*, 2(4), 125-138.
- Gil, H., Crespo, P. (2013). *Ingeniería conceptual de una planta de tratamiento para el agua de consumo de la comunidad el cobre del estado Táchira*. Tesis de grado. Maracaibo: Universidad Rafael Urdaneta.
- Gordillo de Coss, G. E. (2013). *Investigación técnica y económica sobre desinfección de aguas residuales por sistemas de oxidación*. Tesis doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Hristov, J., Barreiro-Hurle, J., Salputra, G., Blanco, M., Witzke, P. (2021). Reuse of treated water in European agriculture: potential to address water scarcity under climate change. *Agricultural Water Management*, 251, 106872.
- Islami, B. B., Priadi, C. R., Adityosulindro, S., Abdillah, A. (2019). Wastewater disinfection efficiency using one-step and two-step chlorination. *MATEC Web of Conferences*, 280, 05015.
- Jiménez, B. E. (2001). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México D. F.: Editorial Limusa.
- Li, L. (2023). *Escasez de agua, crisis climática y seguridad alimentaria mundial: un llamamiento a la acción colaborativa* [en línea] disponible en: <https://www.un.org/> [consulta: 23 noviembre 2023].
- Metcalf y Eddy. (2003). *Wastewater engineering*. 4^{er} Edition. New York: McGraw-Hill.
- Rojas-Higuera, N., Sánchez-Garibello, A., Matiz-Villamil, A., Salcedo-Reyes, J. C., Carrascal-Camacho, A. K., Pedroza-Rodríguez, A. M. (2010). Avaliação de três métodos para a inativação de coliformes totais e *Escherichia coli* presentes em águas residuais domésticas utilizadas para a irrigação. *Universitas Scientiarum*, 15(2), 139-149.
- Soderberg, C. A. P. (2016). Guías de EPA-2012 para la reutilización de aguas residuales para la agricultura. *Perspectivas en Asuntos Ambientales*, 5, 13-21.
- Tartabull Puñales, T., Betancourt Aguilar, C. (2016). La calidad del agua para el riego. Principales indicadores de medida y procesos que la impactan. *Revista Científica Agroecosistemas*, 4(1), 47-61.
- USEPA. (1999). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: desinfección con cloro*. EPA 832-F-99-062. Washington: United States Environmental Protection Agency (USEPA).
- Valencia, E., Aragón, R. A., Romero, J. (2012). Potencial de reutilización del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Nátaga en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, 15(1), 77-86.
- Werkneh, A. A., Islam, M. A. (2023). Post-treatment disinfection technologies for sustainable removal of antibiotic residues and antimicrobial resistance bacteria from hospital wastewater. *Heliyon*, 9, e15360.



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Volumen 46. Año 2023, Edición continua _____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en diciembre 2023, por el **Fondo Editorial Serbiluz**, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientificaluz.org