

EFECTO DEL PUNTO DE PRECLORACIÓN SOBRE LA FORMACIÓN DE TRIHALOMETANOS EN PROCESOS CONVENCIONALES DE POTABILIZACIÓN DE AGUA*

Sindy Arjona-Rodríguez**
Patricia Torres-Lozada***
Camilo Cruz-Vélez****
Diana Loaiza-Cadavid*****
Juan Escobar-Rivera*****

Recibido: 28/07/2011

Aceptado: 04/05/2012

RESUMEN

En las plantas de potabilización es muy común el uso de cloro como desinfectante para controlar el riesgo microbiológico que presentan las aguas superficiales; sin embargo, este producto puede reaccionar con la materia orgánica natural (MON) favoreciendo la formación de subproductos orgánicos no deseados. En la planta Puerto Mallarino de la ciudad de Cali (Colombia), se evaluó a escala real el efecto del punto de precloración sobre la formación de trihalometanos (THM) analizando dos secuencias de tratamiento: 1. Precloración-Coagulación-Clarificación y 2. Coagulación-Clarificación-Precloración. En promedio, los resultados evidenciaron menor formación de THM en la secuencia 2 (0,71 µg/L) comparado con la secuencia 1 (12,88 µg/L), representando una reducción del 94,5%. En ambas condiciones se redujo el riesgo químico sin comprometer la calidad microbiológica del agua clarificada.

Palabras clave: precloración, materia orgánica natural, trihalometanos, potabilización de agua, riesgo sanitario.

* Artículo de investigación. Proyecto "Fortalecimiento de las capacidades analíticas para identificación de riesgos sanitarios en el agua cruda del río Cauca y aplicación de estrategias para la minimización del riesgo en los procesos de potabilización" financiado por EMCALI EICE ESP y la Universidad del Valle.

** Ing. Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA), Universidad del Valle. Ciudad Universitaria Meléndez. E-mail: sparjona@yahoo.com.

*** Ing. PhD. Prof. Titular Universidad del Valle. Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA), Ciudad Universitaria Meléndez. E-mail: patricia.torres@correounivalle.edu.co.

**** Ing. M.Sc., Prof. Asociado Universidad del Valle. Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA). Ciudad Universitaria Meléndez. E-mail: camilo.cruz@correounivalle.edu.co.

***** Ing. M.Sc., Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA), Universidad del Valle. Ciudad Universitaria Meléndez. E-mail: diana-esmeralda.loaiza@cvc.gov.co.

***** Ing. PhD. Jefe de Operación Planta Puerto Mallarino, EMCALI EICE ESP. E-mail: jcescobar@emcali.com.co.

EFFECT OF THE PRECHLORINATION POINT ON THE TRIHALOMETHANES FORMATION IN CONVENTIONAL WATER TREATMENT PROCESS

ABSTRACT

On the drinking water treatment plants is normal the use of chlorine as disinfectant to control the microbiological risk that the superficial waters present; however, this product can be reacts with the organic natural matter (MON) favoring the formation of undesirable organics by-products. In Puerto Mallarino drinking water treatment plant based in Cali (Colombia), the effect of prechlorination point over the generation of trihalomethanes (THM) was evaluated at full scale. Two treatment sequences were considered: 1. Prechlorination-Coagulation-Clarification and 2. Coagulation-Clarification-Prechlorination. In average, results show a lower THM formation in the sequence 2 (0,71 µg/L) if compared with the sequence 1 (12,88 µg/L), which represents a 94,5% reduction. In both conditions, chemical risk was reduced without compromising the microbiological quality of clarified water.

Key words: prechlorination, natural organic matter, trihalomethanes, drinking water treatment, sanitary risk.

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica natural (MON) en las fuentes de agua se origina por descomposición de biomasa terrestre y acuática, lixiviación por escorrentía de material orgánico del suelo [1], como resultado de procesos químicos y biológicos en ríos y lagos, y por descargas puntuales que pueden contener sustancias orgánicas [2]. La concentración de MON se puede medir como carbono orgánico total (COT) y disuelto (COD), absorbancia UV_{254} y potencial de formación de trihalometanos (PFTHM) [3].

La MON genera color, sabor y olor, fomenta el crecimiento de biopelícula en los sistemas de abastecimiento de agua [4], interfiere en la remoción de hierro y manganeso, incrementa la demanda de químicos y los costos de tratamiento, potencia el transporte de sustancias orgánicas hidrofóbicas adsorbidas y de contaminantes inorgánicos [2], agrava la corrosión en tuberías y, lo más importante, reacciona con el desinfectante usado en la oxidación y desinfección del agua formando subproductos de desinfección (SPD) entre los que se incluyen los trihalometanos (THM), ácidos haloacéticos (HAA) y otros compuestos halogenados [4, 5].

Más de 700 especies de SPD han sido identificadas [5], siendo los THM (cloroformo, bromoformo, dibromoclorometano, bromodiclorometano) el grupo de mayor atención por ser comúnmente encontrados y estar asociados con potenciales efectos cancerígenos y daños reproductivos en animales de laboratorio y considerados como posibles cancerígenos en humanos [6]. Ante esto, se ha planteado reducir el uso de desinfectante, pero la preocupación por enfermedades de origen hídrico asociadas a microorganismos patógenos resistentes impide tomar esta determinación [7], ya que la mayoría de problemas de salud asociados con el agua son por contaminación microbiana con bacterias, virus, protozoarios y enteropatógenos como *Cryptosporidium* spp. y *Giardia duodenalis* [6].

Los desinfectantes más usados son: cloro gaseoso, cloraminas, hipoclorito de sodio y, en menor

proporción, dióxido de cloro, ozono y radiación ultravioleta. En Estados Unidos la mayoría de los sistemas de tratamiento utilizan cloro gaseoso como agente desinfectante, el cual es un fuerte oxidante que, además de fomentar la inactivación de microorganismos patógenos, favorece la oxidación de hierro y manganeso, el control de olor y sabor, la reducción de color, la optimización de otros procesos, el control del crecimiento biológico en las unidades de tratamiento y garantiza un residual que previene el crecimiento microbiano y protege el agua tratada de una recontaminación en el sistema de distribución [8].

Sin embargo, a pesar de sus múltiples ventajas, la aplicación de cloro en la etapa de precloración ha sido cuestionada por su incidencia directa en la formación de SPD en aguas con elevado contenido orgánico [7].

En el mundo se proponen estrategias en cada componente del sistema para el control del riesgo químico por formación de SPD: reducción de descargas con alto contenido de MON en las fuentes de abastecimiento [2], uso de carbón activado en polvo (CAP), la filtración por membrana para reducir la MON, el control de la dosis de desinfectante, el cambio del tipo de desinfectante y del punto de aplicación, la coagulación mejorada, la combinación de estrategias de tratamiento en los procesos de tratamiento y, en el sistema de distribución, la remoción de SPD ya formados [9].

Experiencias a escala real han demostrado que cambiar el punto de aplicación de cloro después de la coagulación reduce sustancialmente la formación de SPD. Summers [9] logró reducir el porcentaje de haluros orgánicos totales hasta en un 40% en 6 de 11 plantas de potabilización evaluadas moviendo el punto de aplicación de cloro posterior a la mezcla rápida y evidenció que las reducciones promedio de THM fueron nulas al preclorar antes de la mezcla rápida, del 1,6% después de la mezcla rápida, alrededor del 8,7% después de la floculación y del 21% después de la sedimentación. En Grecia se encontró que el mayor incremento de THM estuvo asociado

con el aumento del tiempo de contacto del cloro, con un valor promedio de 2,3 µg/L en el canal de mezcla rápida y de 47,5 µg/L en el agua tratada [10], mientras que en Egipto también se confirmó que los THM en el agua después de la precloración aumentaron de 20 a 40 µg/L en el efluente clarificado y de 25 a 50 µg/L en el efluente filtrado [11].

En un estudio de tratabilidad a escala de laboratorio del agua del río Cauca [12] se confirmó que la eficiencia en la remoción de coliformes totales y fecales no se vio afectada al cambiar la secuencia de aplicación de coagulante y desinfectante pero se observó una menor producción de THM para la secuencia Coagulación-Precloración. Sin embargo, suspender la precloración favorece la presencia de algas, organismos formadores de biopelícula

y peces en unidades de clarificación, y ocasiona que bacterias planctónicas generen problemas de olor y sabor, y fomenten la protección de bacterias patógenas [13].

En la investigación que da lugar a este artículo se evaluó a escala real el efecto del cambio del punto de precloración sobre la reducción del riesgo químico y el control del riesgo microbiológico en la planta de potabilización que abastece alrededor del 60% de la población de la ciudad de Cali.

1 MATERIALES Y MÉTODOS

La planta Puerto Mallarino (PM) capta agua del río Cauca y la somete a tratamiento convencional mediante una infraestructura que se detalla en la figura 1. En el tratamiento se aplica CAP, cloro

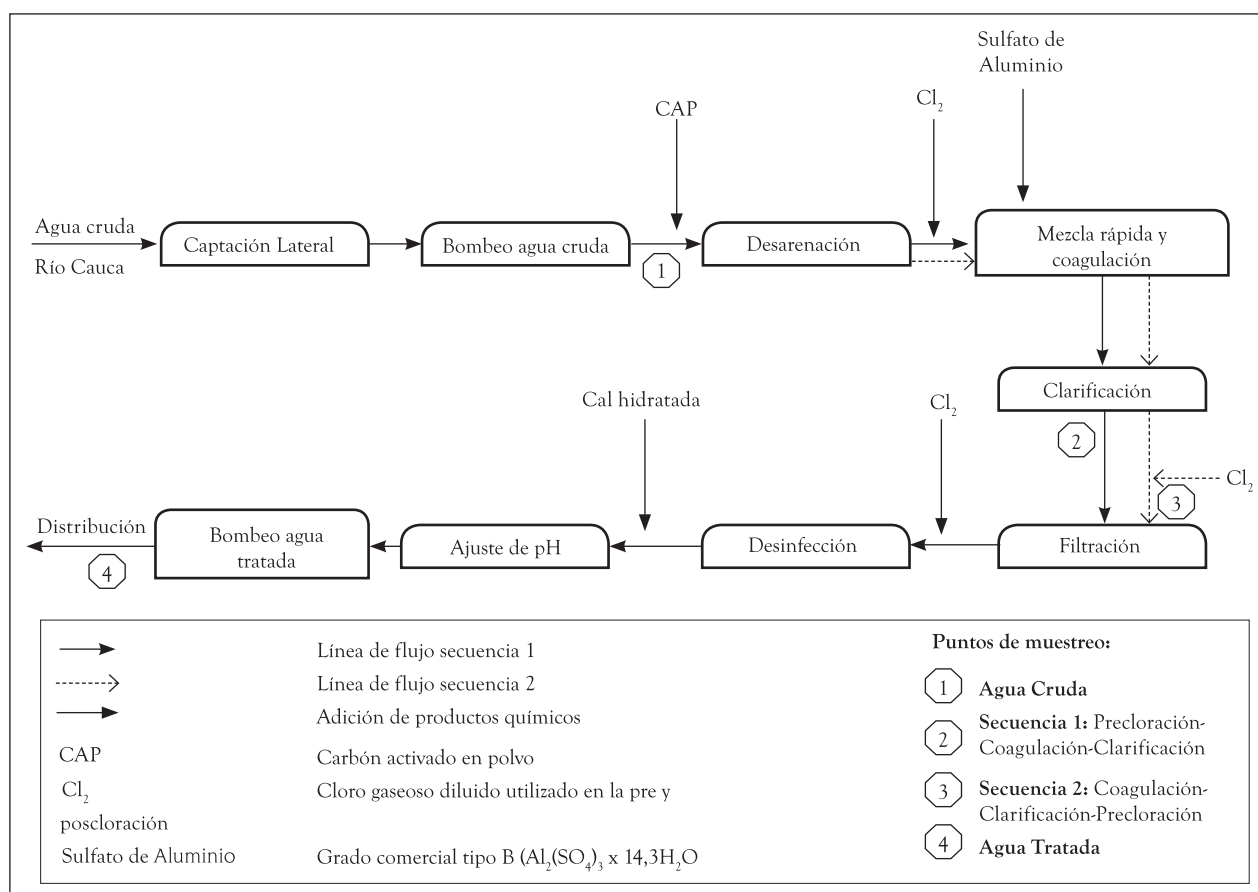


Figura 1. Esquema general de la planta de potabilización

Fuente: elaboración propia

gaseoso (precloración y postcloración), sulfato de aluminio como coagulante y cal hidratada para ajuste final de pH.

Se evaluaron dos puntos de aplicación del cloro en la etapa de precloración, de acuerdo con dos secuencias: 1: Precloración-Coagulación-Clarificación (PreCl.-Coag.-Clarif.) y 2: Coagulación-Clarificación-Precloración (Coag.-Clarif.-PreCl.). Para garantizar ambas condiciones, se hicieron modificaciones en el tren de tratamiento y se operó previamente bajo estas condiciones durante 12 horas para adaptar el proceso antes del muestreo. El monitoreo del agua se efectuó durante las 28 horas siguientes a la etapa de adaptación, colectando muestras de agua cruda, clarificada con precloración antes de coagulación (secuencia 1), clarificada con posterior precloración (secuencia 2) y tratada.

La coagulación se realizó bajo las condiciones de operación de la planta, con dosis de sulfato de aluminio entre 24 y 26 mg/L y pH de coagulación entre 6,3 y 6,6 unidades. El criterio utilizado para

definir la dosificación de cloro en la precloración fue garantizar un residual de cloro libre entre 0,5 y 1,0 mg/L en el agua clarificada. Las características de calidad de agua cruda y clarificada fueron medidas *in situ* o en laboratorio teniendo en cuenta los métodos propuestos y adaptados de [14]. El PFTHM_{24 horas} simuló las condiciones del sistema de distribución de agua, pH $8,0 \pm 0,2$ unidades, temperatura 21 ± 2 °C, tiempo de contacto 24 horas y concentración de cloro residual libre entre 1,0 y 1,5 mg/L. Se realizó el cálculo de la absorbancia ultravioleta específica (SUVA, por sus siglas en inglés) definida como la relación entre UV_{254} y COD multiplicada por 100 y considerada como indicadora de la susceptibilidad a la reducción de la MON presente en el agua [3, 10].

2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización del agua cruda captada durante el ensayo (tabla 1) muestra que los valores de pH, alcalinidad total, turbiedad, color aparente y

Tabla 1. Caracterización del agua cruda del río Cauca

Característica	Unidad	Mín	Máx	Prom	S	Q2	n
pH	Unidades	6,87	7,31	–	–	7,03	28
Alcalinidad total	mg/L	22,70	39,70	26,79	3,59	25,95	28
Turbiedad	UNT	44,30	62,90	52,14	4,13	52,10	28
Color aparente	UPC	306,00	494,00	400,42	44,95	401,50	26
Color verdadero		14,00	61,00	32,96	13,05	30,00	28
UV_{254}	cm ⁻¹	0,059	0,119	0,092	0,015	0,094	28
COD	mg/L	1,45	1,72	1,56	0,09	1,53	13
SUVA	L/mg·m	3,43	6,87	5,61	1,03	5,25	13
PFTHM _{24 horas}	µg/L	41,60	51,84	48,10	5,65	50,86	3
PFTHM _{7 días}		66,36	69,57	68,45	1,81	69,41	3
Bacterias Heterotróficas	UFC/100 mL	2,4E+6	8,6E+6	4,7E+6	2,3E+6	4,5E+6	7
Coliformes totales		2,8E+4	7,5E+5	2,3E+5	2,5E+5	1,6E+5	7
Coliformes fecales		3,5E+3	1,5E+5	3,6E+4	5,1E+4	2,0E+4	7
Min: mínimo, Máx: máximo, Prom: promedio, S: desviación estándar, Q2: mediana, n: número de datos							

Fuente: elaboración propia.

verdadero coinciden con los valores típicos del agua del río Cauca a la altura de la bocatoma de la planta en época de verano y con rangos representativos de fuentes superficiales [15]. Los contenidos de COD fueron bajos y constantes; para ríos no contaminados el COD proviene de fuentes naturales y es relativamente estable con valores entre 1 y 3 mg/L para pequeñas corrientes superficiales y 2 a 10 mg/L para ríos de mayor caudal [16].

Aunque se ha encontrado una buena correlación entre SUVA y PFTHM [5], especialmente en aguas con SUVA relativamente altos ($> 2 - 3$ L/mg-m), esta situación no se presentó durante el estudio, lo cual podría estar asociado al bajo contenido de COD registrado (< 2 mg/L) y de sustancias húmicas que suponen ser más susceptibles de reaccionar con cloro u otros desinfectantes para la formación de SPD. Las características microbiológicas

indican alta contaminación fecal de calidad muy deficiente según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) [17].

En general, el agua clarificada obtenida bajo las dos secuencias estudiadas cumple con lo estipulado en normas nacionales [18] y recomendaciones internacionales [6] de calidad de agua tratada, a pesar de que solo se trata de agua clarificada (tabla 2). En promedio la turbiedad y el color aparente fueron menores al preclorar antes de la coagulación, con una posible asociación a que esta secuencia mejora el proceso de coagulación [19]. Cabe destacar que la alcalinidad en la secuencia 1 fue menor que al preclorar después de clarificar, situación asociada probablemente al mayor tiempo de contacto con el cloro adicionado y a su hidrolización formando ácidos hipocloroso y clorhídrico, que conllevan a una reducción de la alcalinidad [19].

Tabla 2. Efecto de la secuencia de tratamiento en la calidad del agua clarificada

Característica	Unidad	Secuencia 1				Secuencia 2			
		Min	Máx	Prom	n	Min	Máx	Prom	n
pH	Unidad	6,30	6,40	-	28	6,50	6,60	-	28
Alcalinidad total	mg/L	7,30	14,30	10,69	28	12,30	21,00	16,17	27
Turbiedad	UNT	1,10	2,50	1,68	28	1,60	4,20	2,48	28
Color aparente	UPC	6,00	21,00	9,85	27	10,00	28,00	15,30	27
Color verdadero		3,00	7,00	4,86	7	3,00	10,00	4,90	10
UV ₂₅₄	cm ⁻¹	0,011	0,030	0,019	28	0,011	0,034	0,020	26
COT	mg/L	0,75	1,08	0,88	13	0,68	1,02	0,88	13
COD		0,71	0,94	0,84	13	0,66	0,88	0,75	13
THM	µg/L	11,23	13,50	12,88	4	0,52	0,84	0,71	4
PFTHM _{24 horas}		15,62	26,78	22,41	4	12,24	23,57	17,30	4
PFTHM _{7 días}		22,20	35,17	27,25	4	19,56	30,62	24,25	4
Bacterias Heterotróficas	UFC/100 mL	7,0	170,0	53,0	6	150,0	500,0	290,0	6
Coliformes totales		0,0	1,0	0,1	7	0,0	2,0	0,5	6
Coliformes fecales		0,0	0,0	0,0	7	0,0	0,0	0,0	6

Min: mínimo, Máx: máximo, Prom: promedio, n: número de datos

Fuente: elaboración propia.

Las concentraciones de COT y COD fueron inferiores a 2 mg/L en ambos tipos de agua clarificada, similares a las reportadas en la evaluación a escala real realizada en la misma planta de potabilización [13] en donde se reportó una concentración de COT promedio igual a 0,97 mg/L cuando la precloración se realizó después de la clarificación y

de 1,24 mg/L al aplicarla antes de la coagulación. En la secuencia 1, las concentraciones de COD y los THM fueron en general más altas que en la 2 (figuras 2 y 3, respectivamente).

Aunque el PFTHM del agua clarificada en la secuencia 2 fue menor, estadísticamente no se identificaron diferencias significativas entre las dos

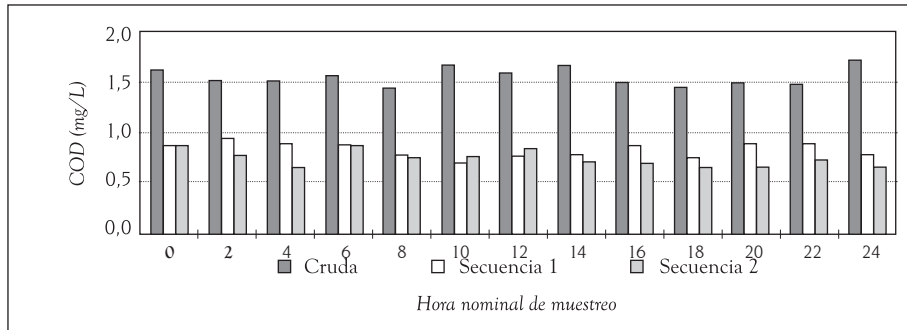


Figura 2. Efecto del cambio del punto de aplicación de cloro en las concentraciones de COD

Fuente: elaboración propia.

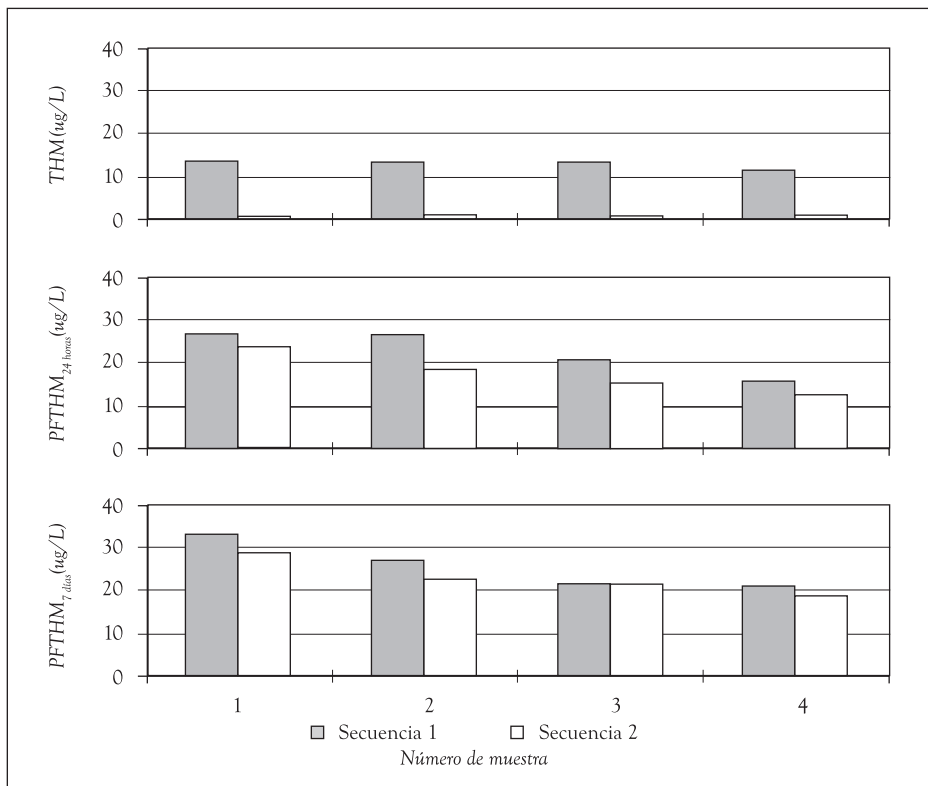


Figura 3. Efecto del cambio del punto de aplicación de cloro en la formación de THM

Fuente: elaboración propia.

condiciones evaluadas (prueba Wilcoxon: p-valor $PFTHM_{24 \text{ horas}} = 0,20$ y $PFTHM_{7 \text{ días}} = 0,89$, software estadístico R).

La concentración de bacterias heterotróficas fue mayor (entre 150 y 500 UFC/100 mL) para la secuencia 2, lo cual estaría asociado con el corto tiempo de contacto entre la aplicación de cloro y el monitoreo y con el hecho de que estas agrupan un amplio espectro de microorganismos, desde los sensibles a procesos de desinfección hasta los que rápidamente proliferan en agua sin desinfectante residual [6]. El valor máximo de coliformes totales (2 UFC/100 mL) se presentó en el agua clarificada de la secuencia 2, pero esto no generó riesgo en la calidad del agua tratada, ya que posterior a la clarificación, se hizo filtración y postcloración. En ninguna de las secuencias evaluadas se registró la presencia de coliformes fecales.

El agua tratada producida en la planta PM, resultante de la combinación de las dos secuencias de tratamiento evaluadas (agua clarificada con y sin precloración previa), cumplió con lo reglamentado para el territorio colombiano [18] y lo recomendado internacionalmente [6] en agua para consumo con respecto a las características determinadas.

3 CONCLUSIONES

Bajo las secuencias de tratamiento evaluadas se evidenció una menor formación de THM cuando se hizo la precloración después de la clarificación. En ambas alternativas, las concentraciones de COD en el agua clarificada fueron adecuadas (< 2 mg/L) para la aplicación de postcloración y se

presentó un bajo riesgo por PFTHM (menor a 40 $\mu\text{g/L}$, a las 24 horas y 7 días).

La evaluación del cambio del punto de precloración sugiere que la eficiencia en la reducción del riesgo microbiológico, en términos de coliformes totales y fecales, no estuvo influenciada por la secuencia de aplicación del desinfectante; sin embargo, para las bacterias heterotróficas se evidenció que el corto tiempo de contacto con el cloro afectó la reducción de estos microorganismos.

A pesar del alto riesgo microbiológico de la fuente, los procesos de tratamiento previos a la filtración y los niveles de cloro aplicados en la planta en la predesinfección, las dos condiciones evaluadas permitieron la reducción total de los coliformes y con la ayuda adicional de los procesos de filtración y postcloración, se garantizó la producción de agua con los estándares de calidad requeridos.

El análisis del control del riesgo microbiológico permite concluir que al cambiar el punto de aplicación de cloro posterior a la clarificación es posible reducir el riesgo químico sin comprometer la calidad microbiológica del agua tratada, por lo cual se recomienda continuar con este tipo de ensayos en la planta PM por períodos de tiempo mayores, lo cual permitirá evaluar otras variables como crecimiento de algas o biopelícula.

4 AGRADECIMIENTOS

A EMCALI EICE ESP y a la Universidad del Valle por el apoyo técnico y financiero para la ejecución del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] T. Karanfil et al., "Selecting filter membranes for measuring DOC and UV254," *JAWWA*, vol. 95, no. 3, pp. 86-101, 2003.
- [2] A. Matilainem et al., "Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review," *Colloid Interf Sci*, vol. 159, no. 2, pp. 189-197, 2010.
- [3] A. D. Archer, y P. C. Singer, "An evaluation of the relationship between SUVA and NOM coagulation using ICR database," *JAWWA*, vol. 98, no. 7, pp. 110-123, 2006.
- [4] C. Chen et al., "Disinfection by-products and their precursors in a water treatment plant in North China: Seasonal changes and fraction analysis," *Sci Total Environ*, vol. 397, pp. 140-147, 2008.
- [5] N. Ates et al., "Occurrence of disinfection by-products in low DOC surface waters in Turkey," *J Hazard Mater*, vol. 142, pp. 526-534, 2007.
- [6] World Health Organization. "Guidelines for Drinking Water Quality. Third edition incorporating the first and second addenda," [En línea], acceso junio 2011; Disponible: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/fulltext.pdf, 2008.
- [7] Environmental Protection Agency. "Microbial and disinfection byproduct rules. Simultaneous compliance guidance manual," [En línea], acceso mayo 2011; Disponible: <http://www.epa.gov/OGWDW/mdbp/simult.pdf>, 1999.
- [8] Black & Veatch Corporation, *White's handbook of chlorination and alternative disinfectants*, 5 ed.: Wiley, 2010, 960 p.
- [9] Environmental Protection Agency. "Enhanced coagulation and enhanced precipitative softening guidance manual," [En línea], acceso junio 2011; Disponible: <http://www.epa.gov/OGWDW/mdbp/coaguide.pdf>, 1999.
- [10] S. Golfinopoulos, "The occurrence of trihalomethanes in the drinking water in Greece," *Chemosphere*, vol. 4, pp. 1761-1767, 2000.
- [11] M. F. El-Shahat et al., "Factors influencing the formation of trihalomethanes in drinking water treatment plants," *Bull Environ Contam Toxicol*, vol. 67, pp. 549-553, 2001.
- [12] J. C. Escobar et al., "Evaluación del punto de precloración en la reducción de trihalometanos y control microbiológico en el agua cruda de río Cauca," presentado en 50° Congreso de ACODAL y 12° Bolivariano de AIDIS, Santa Marta, 2007.
- [13] L. E. Caballero, y O. Velásquez, "Efecto del cambio en el punto de precloración sobre la calidad del agua clarificada: caso planta Puerto Mallarino," tesis de Ingeniero, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, 2005.
- [14] American Water Works Association et al., *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21 ed., Washington DC, 2005, 1368 p.
- [15] D. Chapman, ed, "Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring," 2 ed., Cambridge: University Press, 1996, 609 p.
- [16] S. Tao, "Spatial and temporal variation in DOC in the Yichun river, China," *Water resources research*, vol. 32, no. 7, pp. 2205-2210, 1997.
- [17] RAS 2000. *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico*. Título B. Ministerio de Desarrollo Económico de la República de Colombia, 2000.
- [18] Resolución 2115 de 2007. Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial.
- [19] E. A. Bryant et al., *Disinfection alternatives for safe drinking water*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, 102 p.