



Evaluación de la preoxidación para remover carbono orgánico disuelto y disminuir la formación de trihalometanos en la potabilización*

María Fernanda Guerra**, Diana Catalina Rodríguez***, Gustavo Antonio Peñuela Mesa****

Valuation of the pre-oxidation to remove organic dissolved carbon and reduce trihalomethanes in water purification

Avaliação da pré-oxidação para remover carbono orgânico dissolvido e diminuir a formação de trihalometanos na potabilização

RESUMEN

Introducción. La materia orgánica presente en el agua de abastecimiento puede ocasionar problemas a las plantas de potabilización, como alteración en las propiedades organolépticas del agua, aumento en los costos de potabilización e incrementos en la formación de subproductos de la desinfección. **Objetivo.** Evaluar la pre-oxidación como una alternativa para mejorar la remoción de carbono orgánico disuelto

(COD) y/o disminuir la formación de trihalometanos durante los procesos de potabilización. **Materiales y métodos.** Se realizaron experimentos mediante un ensayo de test de jarras, en los que se evaluó la eficiencia de dos coagulantes (hidroxicloruro de aluminio y sulfato de aluminio) y de dos agentes oxidantes (peróxido de hidrógeno y dióxido de cloro) para la remoción de COD y la disminución de la formación de trihalometanos como subproducto

*Artículo derivado del proyecto de investigación: "Investigación de biopelículas en las redes de acueducto del municipio de Rionegro". Financiado por la empresa Aguas de Rionegro S.A. E.S.P. a través del convenio 01 del 2013. Vigencia: Febrero de 2013 - Febrero de 2014. **Ingeniera ambiental, estudiante de Maestría en Ingeniería Ambiental. Investigadora en Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON), Universidad de Antioquia. ***Ingeniera Sanitaria, magíster en Ingeniería. Doctora en Ingeniería. Docente investigador de la Universidad de Antioquia, Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON), Universidad de Antioquia. ****Químico, especialista en Gestión Ambiental Municipal, magíster en Ciencias Químicas. Doctor en Química Ambiental. Docente investigador de la Universidad de Antioquia, Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON), Universidad de Antioquia.

de la desinfección con hipoclorito de sodio. También se evaluó el cambio en la turbiedad, color, pH y UV_{254} .

Resultados. En términos de remoción de COD, existe una diferencia significativa ($p = 0,033$) entre la utilización sulfato de aluminio e hidroxiclورو de aluminio, siendo el último más eficiente. Se encontró que la pre-oxidación mejora la remoción de color y turbiedad, y que solo con el peróxido de hidrógeno se comprobó un incremento en remoción de COD.

Conclusiones. La pre-oxidación con H_2O_2 en los

procesos de potabilización es una alternativa viable para remover materia orgánica no húmica o hidrófila. Los valores de trihalometanos no superaron los límites permisibles en Colombia y EE. UU., los cuales son 200 $\mu\text{g/L}$ y de 80 $\mu\text{g/L}$, respectivamente.

Palabras clave: materia orgánica; dióxido de cloro; peróxido de hidrógeno; pre-oxidación, trihalometanos.

ABSTRACT

Introduction. Organic matter in drinking water can cause problems to the purification plants, such as changes in the water's organoleptic properties, an increase of the purification costs and increases in the disinfection byproducts. **Objective.** Evaluate pre-oxidation as an alternative to improve the removal of dissolved organic carbon (DOC) and/or reduce the formation of trihalomethanes during the purification processes. **Materials and methods.** Experiments were carried out by means of a jar test in which the efficiency of two coagulants (aluminum hydroxychloride and aluminum sulphate) and two oxidation agents (Hydrogen peroxide and chlorine dioxide) to remove DOC and reduce trihalomethanes as a byproduct of the disinfection with sodium

hypochlorite. Turbidity, color, pH and UV_{254} changes were also assessed. **Results.** In terms of DOC removal, there is a significant difference ($p = 0,033$) between the use of aluminum sulphate and aluminum oxychloride, and the latter is more efficient. Pre-oxidation improves the color removal and the turbidity, and only with hydrogen peroxide an increase in the DOC removal was proved. **Conclusions.** Pre-oxidation with H_2O_2 in purification processes is a feasible alternative to remove not humic and hydrophilic organic matter. The trihalomethanes' values were not above those allowed in Colombia and USA, 200 $\mu\text{g/L}$ and 80 $\mu\text{g/L}$, respectively.

Key words: organic matter; chlorine dioxide; hydrogen peroxide; pre-oxidation, trihalomethanes.

RESUMO

Introdução. A matéria orgânica presente na água de abastecimento pode ocasionar problemas nas plantas de potabilização, como alteração nas propriedades organolépticas da água, aumento nos custos de potabilização e incrementos na formação de sub-produtos da desinfeção. **Objetivo.** Avaliar a pré-oxidação como uma alternativa para melhorar a remoção de carbono orgânico dissolvido (COD) e/ou diminuir a formação de trihalometanos durante os processos de potabilização. **Materiais e métodos.** Se realizaram experimentos mediante um ensaio de test de jarras, nos que se avaliou a eficiência de dois coagulantes (hidroxiclورو de alumínio e sulfato de alumínio) e de dois agentes oxidantes (peróxido de hidrogeno e dióxido de cloro) para a remoção de COD e a diminuição da formação de trihalometanos

como sub-produto da desinfeção com hipoclorito de sódio. Também se avaliou a mudança na turvação, cor, pH e UV_{254} . **Resultados.** Em termos de remoção de COD, existe uma diferença significativa ($p = 0,033$) entre a utilização sulfato de alumínio e hidroxiclورو de alumínio, sendo o último mais eficiente. Se encontrou que a pré-oxidação melhora a remoção de cor e turvação, e que só com o peróxido de hidrogeno se comprovou um incremento em remoção de COD. **Conclusões.** A pré-oxidação com H_2O_2 nos processos de potabilização é uma alternativa viável para remover matéria orgânica não húmica ou hidrófila. Os valores de trihalometanos não superaram os limites permisíveis na Colômbia e E.U.A, os quais são 200 $\mu\text{g/L}$ e de 80 $\mu\text{g/L}$, respectivamente.

Palavras chave: matéria orgânica; dióxido de cloro; peróxido de hidrogeno; pré-oxidação, trihalometanos.

INTRODUCCIÓN

Las plantas de potabilización se han propuesto disminuir cada vez más el contenido de COD en el agua potable. La materia orgánica presente en el agua de abastecimiento proviene de fuentes naturales y fuentes antrópicas, y presenta dos componentes, una parte hidrófoba y otra hidrófila (Matilainen y Sillanpää, 2010). La parte hidrófoba está compuesta de sustancias húmicas, de origen natural, y es la fracción mayoritaria de la materia orgánica en el agua (Uyguner-Demirel y Bekbolet, 2011). Las sustancias húmicas dan color al agua cuando están presentes en altas concentraciones e interaccionan con otros componentes en el agua como cationes, nutrientes y contaminantes químicos (Tranvik y Von Wachenfeldt, 2009), con los cuales forman complejos que son capaces de transportarse en el agua (Pernet-Coudrier et al., 2011).

La parte hidrófila de la materia orgánica se conoce como sustancias no húmicas, cuya presencia en el agua proviene principalmente de las descargas de aguas residuales domésticas e industriales (Pernet-Coudrier et al., 2011). Pese a su estructura de baja aromaticidad, las sustancias no húmicas tienen la misma capacidad que las sustancias húmicas para formar complejos; sin embargo, su bajo peso molecular hace que esta parte sea difícil de remover en un proceso de potabilización convencional (Labanowski y Feuillade, 2011).

La presencia de la materia orgánica en el agua puede causar problemas de olor, color y sabor en el agua. Una mayor cantidad de materia orgánica en el agua de abastecimiento indica mayores dosis de coagulante y más probabilidad de que quede COD en el agua potable y formar subproductos durante la desinfección con cloro. Las anteriores implicaciones conducen a un incremento en los costos del proceso de potabilización (Matilainen y Sillanpää, 2010). Los subproductos indeseables en el proceso de desinfección son formados al reaccionar la materia orgánica que no se removió en los procesos anteriores con el agente desinfectante (Richardson y Postigo, 2012). En el caso de la desinfección con cloro se producen,

entre otros, los trihalometanos (THM), que son los más abundantes junto con los ácidos haloacéticos (HAA) (Matilainen, Vepsäläinen, y Sillanpää, 2010). Algunos trihalometanos son considerados carcinogénicos en animales de laboratorio (Bull et al., 1995); por ejemplo, se ha reportado que el consumo de trihalometanos favorece el crecimiento de tumores en hígado, riñones e intestino de roedores (Dunnick y Melnick, 1993). En humanos se conocen efectos adversos sobre el desarrollo del embarazo (Bove et al., 2002). El consumo de concentraciones moderadas de trihalometanos en mujeres embarazadas se ha relacionado con el aborto espontáneo (Swan et al., 1998) y la muerte fetal (Dodds et al., 1999). Los compuestos hidrófobos de la materia orgánica son los precursores más importantes para la formación de los DBP; sin embargo, los compuestos hidrófilos también pueden desempeñar un papel significativo en su formación, especialmente en aguas con bajos niveles de componentes húmicos (Matilainen y Sillanpää, 2010) donde juegan el papel principal (Labanowski y Feuillade, 2011).

La preoxidación en la potabilización está destinada a la remoción de materia orgánica, generalmente mejora los procesos de coagulación y floculación, por el incremento del número de grupos funcionales ácidos capaces de unirse a los productos de hidrólisis metálicos (Camel y Bermond, 1998). En la pre-oxidación se fracciona la materia orgánica, facilitando la función del agente coagulante, logrando incrementar la remoción de la materia orgánica, y por ende, menor cantidad de subproductos durante la desinfección con cloro. Sin embargo, dosis altas de pre-oxidante afectan de forma negativa la coagulación, debido a que la oxidación de la materia orgánica genera compuestos de menor peso molecular, hidrófilos difíciles de remover en la coagulación (Singer, 1999). La dosis de oxidante depende de la composición de la materia orgánica y del contenido de otros compuestos que demanden oxidante en el agua, y de la fuerza de oxidación del oxidante utilizado (Matilainen et al., 2010).

En esta investigación, se evaluó la pre-oxidación como una alternativa para disminuir la presencia de COD en el agua potable. Se realizaron experimentos a diferentes concentraciones de coagulantes y oxidantes en dos fuentes de abastecimiento a una planta de potabilización. Se compararon las eficiencias de remoción en términos de turbiedad, color aparente y carbono orgánico disuelto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Agua de abastecimiento

En este estudio se examinaron tres tipos de agua de abastecimiento empleados en una planta de potabilización en el oriente antioqueño de Colombia (Rionegro). La primera, procedente de un río que es receptor de grandes cantidades de contaminantes provenientes de vertimientos domésticos e industriales, depósito de residuos sólidos y vertimiento de sustancias agroindustriales. La segunda, procedente de una microcuenca (embalse) conformada por poblaciones rurales que desarrollan actividades como la agricultura y la ganadería, que le han causado la contaminación y el deterioro en la calidad del agua, ocasionando el crecimiento de plantas acuáticas, que dificultan el tratamiento de potabilización del agua. La tercera, una mezcla de las dos fuentes anteriores en una proporción 70:30 río y embalse, respectivamente.

Ensayo de test de jarras

Los experimentos se efectuaron simulando las condiciones de la planta de potabilización, usando un test de jarras marca EyQ floculador. Los ensayos de test de jarras para el experimento se realizaron según el procedimiento descrito en la tabla 1. Para los experimentos 1 y 2, no se realizó el proceso de pre-oxidación, filtración y cloración. Para el experimento 3 no se realizó el proceso de filtración y cloración.

Diseño de experimentos

Se plantearon cuatro experimentos, los cuales se desarrollaron en el test de jarras bajo los procedimientos descritos a continuación:

- Evaluación de la eficiencia de dos coagulantes (sulfato de aluminio e hidroxiclorigenato de aluminio) en los procesos de coagulación-floculación para la remoción de COD, turbiedad y color aparente.
- Selección de la concentración de trabajo de sulfato de aluminio en los procesos de coagulación-floculación para la remoción de COD.
- Evaluación de la influencia de la pre-oxidación con dos tipos de oxidantes (peróxido de hidrógeno y dióxido de cloro) en la coagulación con sulfato de aluminio para la remoción de turbiedad, color aparente y COD.
- Evaluación de la formación de trihalometanos como subproductos de la desinfección con cloro.

Para los experimentos se utilizaron las concentraciones de coagulantes y oxidantes presentadas en las tablas 2 y 3, respectivamente:

Análisis fisicoquímicos

Los ensayos fueron llevados a cabo en el laboratorio del grupo GDCON, el cual está acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en la Norma 17025:2005 bajo la Resolución 3564/2014. El carbono orgánico disuelto (COD) fue determinado con un analizador de COT Apollo 9000, siguiendo la metodología establecida por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012). La turbiedad y el color aparente se determinaron utilizando un turbidímetro Turb 550 IR y un espectrofotómetro UV-VIS Evolution 600, respectivamente. De igual forma, se realizaron análisis de pH, alcalinidad y color verdadero de acuerdo con los protocolos establecidos en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012). Adicionalmente, para caracterizar la materia orgánica presente en el agua, se determinó la absorbancia a 254 nm usando el método normalizado EPA 415.3. La determinación de la concentración de

peróxido de hidrógeno se realizó por medio de un análisis yodométrico con tiosulfato de sodio y la concentración de dióxido de cloro se

determinó mediante la Ley de Beer utilizando un espectrofotómetro UV-VIS Evolution 600, con una celda de cuarzo de 1 cm de longitud de paso.

Tabla 1. Procedimiento usado en el test de jarras, simulando las condiciones de la planta de potabilización

Proceso	Revoluciones por minuto (rpm)	Tiempo (minutos)	Especificaciones
Pre-oxidación	74	5	Se agregó la dosis de oxidante en 2 L de la muestra y se dejó actuar por 5 minutos a 74 rpm
Coagulación	100	1	Se agregó la dosis de coagulante transcurrido los 5 min y se dejó actuar por 1 minuto a 100 rpm
Floculación	40	20	Transcurrido el minuto se disminuyó la mezcla a 40 rpm y se operó a 20 min
Sedimentación	0	15	Transcurrido los 20 minutos se apagó el sistema de mezcla y a los 15 minutos se procedió a tomar la muestra
Filtración	NA	NA	La muestra se filtró por un filtro cualitativo marca ADVANTEC.
Cloración	NA	NA	Se agregaron 5 ppm de hipoclorito de sodio a la muestra, se guardó en un lugar oscuro por 5 minutos y se procedió a tomar las muestras para trihalometanos.

Fuente: elaborado por los autores

Tabla 2. Concentraciones utilizadas de los coagulantes

Sulfato de aluminio (mg/L)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00
Hidroxiclورو de aluminio (mg/L)	0,75	1,50	2,25	3,00	3,75	4,50

Fuente: elaborado por los autores

Tabla 3. Concentraciones utilizadas de los oxidantes

Peróxido de hidrógeno (mg/L)	0,270	0,540	0,810
Dióxido de cloro (mg/L)	0,025	0,050	0,100

Fuente: elaborado por los autores

Determinación de trihalometanos por cromatografía de gases con detector de microcaptura de electrones (GC- μ ECD)

En los ensayos de preoxidación que presentaron los resultados más altos de remoción de COD, se determinó la producción de trihalometanos mediante cromatografía de gases usando headspace-microextracción en fase sólida (HS-SPME) y cromatografía de gases con detector de microcaptura de electrones. Se utilizó un cromatógrafo de gases GC- μ ECD 6850 Agilent Technologies con una columna DB-624, (6 % cianopropil-fenil, 94 % dimetilpolisiloxano) 30 m x 0,25 mm ID, 1,40 μ m de espesor de película.

El cromatógrafo cuenta con un inyector Split/Splitless con inserto de SPME de 0,75 mm ID, detector de microcaptura de electrones y sistema de procesamiento de datos.

RESULTADOS

Caracterización del agua

En la tabla 4 se presentan los resultados de la caracterización del agua que abastece a la planta de potabilización. Se puede observar que el agua del embalse posee una calidad inferior al agua del río, exceptuando para el carbono orgánico disuelto.

Tabla 4. Caracterización del agua de entrada a la planta de potabilización

Parámetro	Unidades	Río	Embalse	Mezcla 70:30
		Promedio \pm Des. Std	Promedio \pm Des. Std	Promedio \pm Des. Std
Turbiedad	NTU	26,04 \pm 16,31	128,62 \pm 172,60	48,22 \pm 50,52
Color aparente	UPC	247,90 \pm 125,66	1353,70 \pm 1984,95	384,80 \pm 355,74
Color real	UPC	14,38 \pm 13,27	12,98 \pm 14,96	24,87 \pm 14,89
COD	mgC/L	2,13 \pm 0,76	2,23 \pm 0,87	2,22 \pm 0,58
SUVA a 254 nm	-	2,27 \pm 0,81	2,74 \pm 2,10	2,76 \pm 0,65

Fuente: elaborado por los autores

Resultados de los experimentos

Al comparar los tratamientos de coagulación con sulfato de aluminio y con hidroxiclورو de aluminio (también llamado policloruro de aluminio, o simplemente PAC) en el experimento I, se encontró que no existen diferencias estadísticamente significativas en las remociones alcanzadas de turbiedad y color aparente (nivel de significancia > 0,05) para la prueba de medianas y la prueba U de Mann-Whitney. Sin embargo, en la remoción del carbono orgánico disuelto (COD), las diferencias son significativas para la prueba U de Mann-Whitney (sig. 0,033).

La remoción media fue 16,8 % y la máxima 33,5 %, y para el sulfato de aluminio, la remoción media fue 7,9 % y la máxima 30,3 %.

En la figura 2 se presentan las remociones de turbiedad, color y COD obtenidas al utilizar diferentes concentraciones de sulfato de aluminio en el proceso de potabilización. Se puede observar que las remociones en el agua del río son mejores a mayores concentraciones de sulfato de aluminio, a diferencia del agua del embalse donde las remociones son mejores a bajas concentraciones del coagulante.

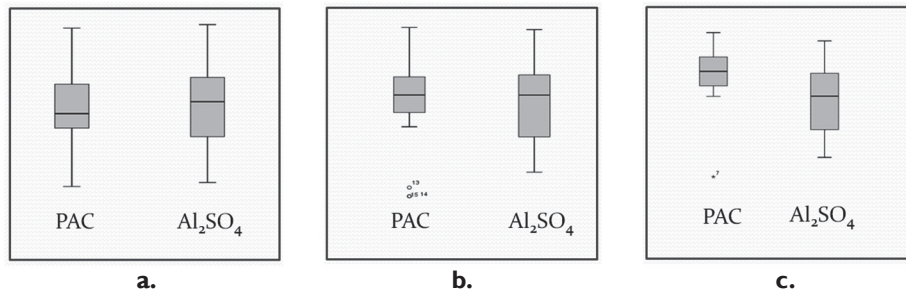


Figura 1. Pruebas estadísticas comparando sulfato de aluminio y pac, y las cajas de bigotes para las remociones de turbiedad, color aparente y cod. A) turbiedad. B) color aparente. C) cod

Fuente: elaborado por los autores

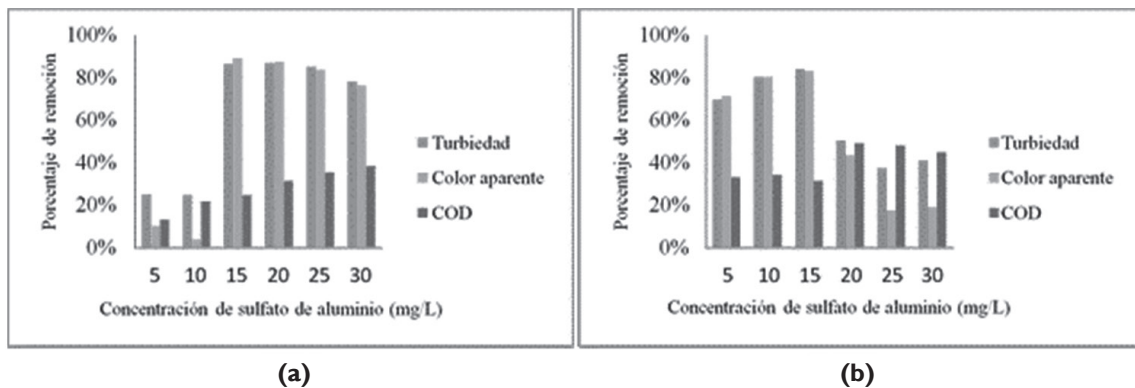


Figura 2. Resultados de las remociones de turbiedad, color aparente y cod para diferentes concentraciones de sulfato de aluminio con el agua del río. A) río 1. B) embalse 2

Fuente: elaborado por los autores

Los resultados del experimento 3 se pueden observar en la figura 3. Las pruebas estadísticas muestran una diferencia significativa entre la utilización de oxidantes antes de la coagulación y el proceso sin oxidación, para la remoción de las tres variables estudiadas (turbiedad, color aparente y COD) (nivel de significancia < 0,05 en la prueba de mediana y Prueba U de Kruskal-Wallis). Sin embargo, para la remoción de COD sólo se presentaron diferencias significativas utilizando como oxidante el peróxido de hidrógeno.

Para el experimento 4, por duplicado, se utilizaron 0,27 mg/L de peróxido de hidrógeno y 0,025 mg/L de dióxido de cloro para tratar el agua del río, y 0,54 mg/L de peróxido de hidrógeno y 0,025 mg/L de dióxido de cloro para tratar el agua del embalse. Los trihalometanos fueron cuantificados con las curvas de calibración de la figura 4.

En las tablas 5 y 6 se muestran los valores promedio de los trihalometanos con el agua proveniente del río y con el agua del embalse, respectivamente.

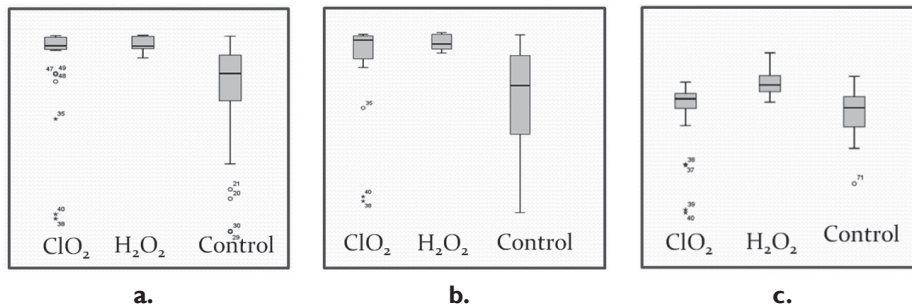


Figura 3. Cajas de bigotes para las remociones. A) turbiedad. B) color aparente. C) cod.

Fuente: elaborado por los autores

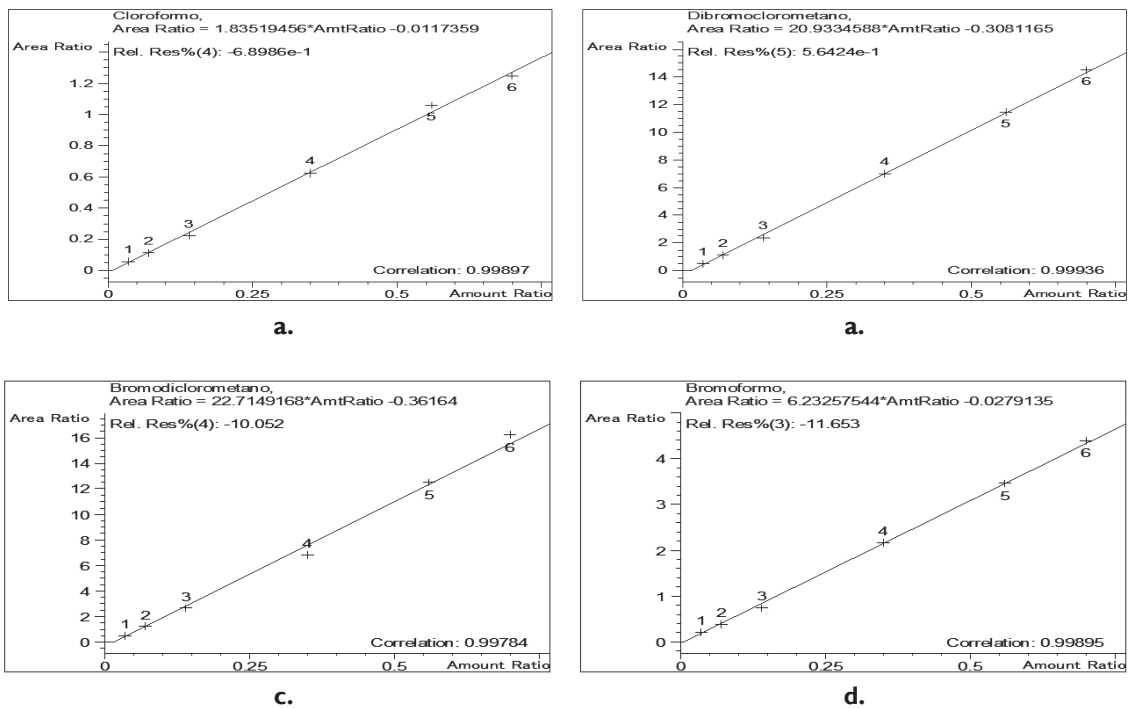


Figura 4. Curvas de calibración de trihalometanos. A) cloroformo. B) dibromoclorometano. C) bromodichlorometano. D) bromoformo.

Fuente: elaborado por los autores

Tabla 5. Resultados de la concentración de trihalometanos en el proceso de potabilización con el agua proveniente del río

Muestra	Unidades	Cloroformo	Bromodicloro metano	Dibromocloro metano	Bromoformo	THMs totales
Al ₂ SO ₄	µg/L	10,63	7,01	5,85	6,87	30,36
Al ₂ SO ₄ + ClO ₂	µg/L	10,69	8,48	9,00	14,40	42,57
Al ₂ O ₄ + H ₂ O ₂	µg/L	11,73	11,27	15,31	31,50	69,80

Fuente: elaborado por los autores

Tabla 6. Resultados de la concentración de trihalometanos en el proceso de potabilización con el agua proveniente del embalse

Muestra	Unidades	Cloroformo	Bromodicloro metano	Dibromocloro metano	Bromoformo	THMs totales
Al ₂ SO ₄	µg/L	10,32	10,56	16,61	36,36	73,85
Al ₂ SO ₄ + ClO ₂	µg/L	11,66	6,31	4,44	3,34	25,76
Al ₂ O ₄ + H ₂ O ₂	µg/L	12,00	9,48	5,97	6,14	33,59

Fuente: elaborado por los autores

DISCUSIÓN

En la tabla 4 se percibe que el agua que abastece a la planta de potabilización proveniente del embalse tiene altos valores de turbiedad y color aparente, mientras que el agua del río posee valores de turbiedad y color aparente menores. De otro lado, el agua proveniente tanto del río como del embalse posee bajo contenido de materia orgánica soluble (por ende, bajo COD, el cual es principalmente de carácter hidrófilo, debido a que posee un $SUVA_{254nm}$ menor a 3 (Matilainen et al., 2011), lo que dificulta su remoción por procesos convencionales de potabilización.

Al comparar los tratamientos con PAC y sulfato de aluminio, tanto en los estadísticos descriptivos como en el diagrama de cajas y bigotes (figura 1) se encuentra que el hidroxiclورو de aluminio (PAC) presenta mayores remociones de COD que el sulfato de aluminio, siendo las dosis requeridas con el hidroxiclورو de aluminio

hasta veinte veces menores que con el sulfato de aluminio, por lo que, a pesar de ser un producto más costoso, es una alternativa atractiva.

Con los resultados del experimento 2 (figura 2), se encontró que la concentración de sulfato de aluminio para obtener la mayor remoción de color y turbiedad no coincide con la dosis para obtener la mayor remoción de COD. Este resultado concuerda con la literatura, ya que la dosis para remover el COD es mayor a la dosis para remover color y turbiedad (Matilainen et al., 2010).

Los resultados sugieren que el proceso de oxidación previo a la coagulación es una buena alternativa para la remoción de turbiedad, color aparente y COD (nivel de significancia < 0,05 en la prueba de mediana y Prueba U de Kruskal-Wallis) (Figura 3). Sin embargo, al comparar las remociones con oxidante y el tratamiento sin oxidación, se observó que la remoción de COD para la oxidación con dióxido de cloro no

tuvo diferencias significativas entre pre-oxidar y no pre-oxidar (nivel de significancia $> 0,05$) en la prueba de medianas y de Mann-Whitney. En contraste, la oxidación con peróxido de hidrógeno mejoró la remoción de las tres variables de respuesta (turbiedad, color aparente y COD).

Entre los dos oxidantes, solo hubo diferencias significativas en la remoción de COD.

Al observar los valores de trihalometanos totales (cloroformo, bromodihalometano, clorodibromometano y bromoformo) se encuentra que no superan los límites permisibles en Colombia (Resolución 2115/2007) y EE. UU. (a través de la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU.-EPA), los cuales son 200 $\mu\text{g/L}$ y de 80 $\mu\text{g/L}$, respectivamente.

El agua del embalse presenta más trihalometanos en comparación con el río, sin usar preoxidante. Cuando se usa preoxidante con el agua del embalse se destruyen los compuestos orgánicos formadores de trihalometanos, a diferencia del agua del río, donde los oxidantes favorecen la formación de compuestos orgánicos que forman halometanos. Con ambas fuentes de agua, el ClO_2 tiene un mayor efecto positivo en comparación con el peróxido de hidrógeno, ya que con el agua del embalse disminuye mucho más la concentración de trihalometanos, y con el agua del río se incrementa menos la concentración de trihalometanos.

CONCLUSIONES

La incorporación de la pre-oxidación con peróxido de hidrógeno en los procesos de potabilización es una alternativa viable para remover materia orgánica no húmica o hidrófila, la cual es difícil de remover por los procesos convencionales y es la principal responsable de la formación de los subproductos de desinfección con cloro. La materia orgánica formada por sustancias no húmicas se encuentra en el agua, principalmente procedente de descargas de aguas residuales a las fuentes de abastecimientos,

por lo que esta alternativa es más tentadora para las plantas de potabilización, que se abastecen de fuentes receptoras de grandes cantidades de contaminantes provenientes de vertimientos domésticos e industriales.

El dióxido de cloro tuvo un mayor efecto positivo en la disminución en la formación de trihalometanos.

La utilización de hidroxidocloruro de aluminio (PAC) como agente coagulante implica mayores remociones de materia orgánica al contrastarlo con el sulfato de aluminio; sin embargo, también implica mayores costos de producción.

AGRADECIMIENTOS

Al grupo GDCON de la Universidad de Antioquia y a la empresa Aguas de Rionegro, por la financiación de la tesis, mediante el convenio 01 de 2013.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Public Health Association, American Water Works Association y Water Environment Federation (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. New York: American Water Works Association.
- Beltrán, E., Ibáñez, M., Sancho, J. V., Hernández, F. (2012). Determination of six microcystins and nodularin in surface and drinking waters by on-line solid phase extraction-ultra high pressure liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1266, 61-68.
- Bove, F., Shim, Y., Zeitz, P. (2002). Drinking water contaminants and adverse pregnancy outcomes: a review. *Environmental health perspectives*, 110 (Suppl 1), 61.
- Bull, R. J., Birnbaum, L., Cantor, K. P., Rose, J. B., Butterworth, B. E., Pegram, R. E. X., Tuomisto, J. (1995). Water chlorination: essential process or cancer hazard? *Toxicological Sciences*, 28 (2), 155-166.
- Camel, V., Bermond, A. (1998). The use of ozone and associated oxidation processes in drinking

- water treatment. *Water research*, 32 (11), 3208-3222.
- Chen, J., Xie, P., Li, L., Xu, J. (2009). First identification of the hepatotoxic microcystins in the serum of a chronically exposed human population together with indication of hepatocellular damage. *Toxicological sciences*, 108 (1), 81-89.
- Dodds, L., King, W., Woolcott, C., Pole, J. (1999). Trihalomethanes in public water supplies and adverse birth outcomes. *Epidemiology*, 10 (3), 233-237.
- Dunnick, J. K., Melnick, R. L. (1993). Assessment of the carcinogenic potential of chlorinated water: experimental studies of chlorine, chloramine, and trihalomethanes. *Journal of the National Cancer Institute*, 85 (10), 817-822.
- Labanowski, J., Feuillade, G. (2011). Dissolved organic matter: Precautions for the study of hydrophilic substances using XAD resins. *Water research*, 45 (1), 315-327.
- Matilainen, A., Sillanpää, M. (2010). Removal of natural organic matter from drinking water by advanced oxidation processes. *Chemosphere*, 80 (4), 351-365.
- Matilainen, A., Gjessing, E. T., Lahtinen, T., Hed, L., Bhatnagar, A., Sillanpää, M. (2011). An overview of the methods used in the characterisation of natural organic matter (NOM) in relation to drinking water treatment. *Chemosphere*, 83 (11), 1431-1442.
- Matilainen, A., Vepsäläinen, M., Sillanpää, M. (2010). Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 159 (2), 189-197.
- Oehrle, S.A., Southwell, B., Westrick, J. (2010). Detection of various freshwater cyanobacterial toxins using ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Toxicon*, 55 (5), 965-972.
- Pernet-Coudrier, B., Companys, E., Galceran, J., Morey, M., Mouchel, J. M., Puy, J., Varrault, G. (2011). Pb-binding to various dissolved organic matter in urban aquatic systems: key role of the most hydrophilic fraction. *Geochemical et Cosmochimica Acta*, 75 (14), 4005-4019.
- Richardson, S. D., Postigo, C. (2012). Drinking water disinfection by-products. In *Emerging organic contaminants and human health* (pp. 93-137). Springer Berlin Heidelberg.
- Rodrigues, M. A., Reis, M. P., Mateus, M. C. (2013). Liquid chromatography/negative electrospray ionization ion trap MS 2 mass spectrometry application for the determination of microcystins occurrence in Southern Portugal water reservoirs. *Toxicon*, 74, 8-18.
- Singer, P. C., American Water Works Association. (1999). Formation and control of disinfection by-products in drinking water. AWWA.
- Swan, S. H., Waller, K., Hopkins, B., Windham, G., Fenster, L., Schaefer, C., Neutra, R. R. (1998). A prospective study of spontaneous abortion: relation to amount and source of drinking water consumed in early pregnancy. *Epidemiology*, 9 (2), 126-133.
- Tranvik, L. J., von Wachenfeldt, E. (2009). Interactions of dissolved organic matter and humic substances. En: G. E. Likens, ed. *Encyclopedia of Inland Waters*. New York: Academic Press, pp. 754-760.
- Uyguner-Demirel, C. S., Bekbolet, M. (2011). Significance of analytical parameters for the understanding of natural organic matter in relation to photocatalytic oxidation. *Chemosphere*, 84 (8), 1009-1031.
- Wang, J., Pang, X., Ge, F., Ma, Z. (2007). An ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for determination of microcystins occurrence in surface water in Zhejiang Province, China. *Toxicon*, 49 (8), 1120-1128.