



Una aproximación
a la evaluación de
subproductos

**de la desinfección en
aguas para consumo
humano en
municipalidades
de Colombia**



JUAN PABLO GONZÁLEZ G.1, JHON HUERTAS2, JOSÉ L. SEPÚLVEDA3

1 Magíster en Ingeniería Civil, Especialista en Ingeniería Ambiental.

jgonzalezg@ustatunja.edu.co - gonzalezgalvis@gmail.com

Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Santo Tomás Tunja, Grupo de investigaciones Ambiental y Civil en Ingeniería ACI - Tunja - Boyacá Colombia.

RESUMEN: Este estudio se realizó a partir de información del monitoreo a las concentraciones de trihalometanos Totales en diferentes puntos de la planta de tratamiento de agua potable y/o de la red de distribución de tres principales acueductos de Colombia, (Bogotá, Medellín y Bucaramanga), algunos datos fueron suministrados por las empresas prestadoras del servicio y otros fueron tomados en campo con un electrodo de medición directa; esto con el fin de investigar la interacción entre diferentes parámetros como pH, turbiedad, cloro residual y temperatura del agua en las redes de acueducto y la formación de subproductos de la desinfección denominados Trihalometanos (THM's). Se observaron importantes correlaciones entre cofactores y el aumento en las concentraciones de THM's en las redes de acueducto; esto permitirá mejorar las técnicas de monitoreo empleadas actualmente para el monitoreo de estos compuestos.

PALABRAS CLAVES: Trihalometanos, Subproductos, Cloración, Monitoreos, Parámetros.

ABSTRACT: This study was made from monitoring information the total trihalomethanes concentrations in different sites of drinking water treatment and the distributions systems for three principal aqueducts of Colombia (Bogotá, Medellín and Bucaramanga), some data were provided by companies and others were taken in field with a direct measurement electrode; this in order the interactions between different parameters such as pH, turbidity, residual chlorine and temperature the drinking water and sub products formations the disinfections calling out trihalomethanes (THM's). Were observed correlations important within cofactors and increased concentrations of THM's in drinking water, this will improve monitoring techniques currently employed for monitoring of these compounds.

KEYWORDS: Trihalomethanes, byproducts, Chlorination, Monitoring, Parameters

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Subproductos de la desinfección

El agua potable es un bien básico de primera necesidad, indispensable para el ser humano y por ello las administraciones locales, autónomas y centrales tienen el deber de suministrar a los ciudadanos este recurso en unas condiciones óptimas de potabilidad. La cloración es uno de los métodos más utilizados para la desinfección del agua. Su uso tiene por objeto la prevención de enfermedades infecciosas que tienen al agua como vehículo y que podrían causar problemas de salud pública. Desde los años setentas (1970), el campo de las investigaciones ha sido enfocado sobre documentación y se ha ido entendiendo la formación de los subproductos de la desinfección en el agua de consumo humano. En años recientes, un particular interés ha ido creciendo en el desarrollo de modelos para estimar la formación de subproductos de la desinfección. (Rodríguez et al; 2003). Muchas variables se han correlacionado con las concentraciones de estos subproductos en los sistemas de abastecimiento.

El principal objetivo de este paper es el de reunir información del monitoreo a las concentraciones de trihalometanos en diferentes puntos de la planta y/o de la red de distribución en diferentes acueductos de Colombia; estos registros serán comparados con normas nacionales e internacionales y así poder obtener un consolidado de las municipales que están generando mayores concentraciones de estos subproductos.

2. Desinfección de aguas para consumo humano

2.1 Productos empleados en procesos de desinfección

La desinfección del agua para consumo humano es un proceso altamente reconocido en el rol que cumple en la reducción de organismos patógenos responsables de numerosas enfermedades. Aunque la desinfección es necesaria para la eliminación de estos organismos patógenos, este puede llevar a la generación de una variedad de químicos, conocidos como subproductos de la desinfección (SPD), los cuales son formados como un resultado de la reacción de desinfectante con materia orgánica en el agua. En los Estados Unidos donde la primera forma de desinfección es la cloración, el agua pública para consumo contiene niveles bajos de muchos (SPD) y son una potencial fuente de exposición a estos compuestos. Donde el potencial para exposición es reconocido como significativa ruta vía ingestión, recientemente especial atención han tomado las rutas de exposición vía inhalación y dérmica. La importancia de cada variedad de rutas varía con los patrones de uso, características psicológicas y una variedad de otros factores. (Wilkes et al., 1996; Olin, 1998). Entre los desinfectantes más conocidos en el siglo XXI está el cloro siendo el más común apropiado y económico. Para la desinfección del agua se

han utilizado tres tipos de cloro; el cloro líquido o gas (Cl_2), hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) e hipoclorito de sodio (NaOCl). (Leidholdt R. et al; 1982). Los procesos de desinfección son afectados por diferentes factores físico-químicos y biológicos y estas eficiencias pueden ser caracterizadas por la dosis y la intensidad. (Gates et al; 1998); el cloro es el más popular y no siempre debido a sus bajos costos, por lo que también este contiene un potencial de oxidación alto, el cual provee un mínimo nivel de cloro residual en los sistemas de distribución y los protege contra la recontaminación de microbios. (Rodríguez et al; 2003); sin embargo el cloro reacciona con compuestos orgánicos, produciendo hidrocarburos halogenados y subproductos, incluyendo trihalometanos THMs (eg. Cloroformo, bromoformo, bromodihalometano, y dibromodihalometano). Trihalometanos THM's y ácidos haloacéticos son los mayores subproductos de la desinfección SPD encontrados en aguas cloradas para consumo humano. Exposición a estos subproductos SPD han sido asociados con cáncer, particularmente en la sangre en humanos. (Cantor et al; 1987, Mc Geehin et al; 1993; King and Marrett, 1996; Freedman et al; 1997). Por lo tanto el riesgo a la salud humana asociado con la exposición de THM's es el resultado de la cloración del agua para consumo humano. Una dificultad en demostrar la asociación y afectaciones a la salud es el largo periodo de tolerancia para desarrollar cáncer y la subsecuente necesidad de reconstruir el consumo de agua y el historial de las exposiciones en un largo periodo de tiempo. (King and Marrett 1996). Otras dificultades para examinar efectos en la salud producidos por los SDP es determinando por cómo está definida la exposición. Investigadores han usado indicadores de calidad del agua como lo es el recurso agua (aguas subterráneas vs aguas superficiales), concentraciones de trihalometanos THM's en suplementos de agua y el histórico de las dosis de cloración para aguas de suplemento como indicador de exposición a SPD. (Lorraine C. Backer et al; 2000). La química de las reacciones entre cloro y materia orgánica es compleja, aunque se ha realizado estudios extensos sobre el tema, se ha logrado un pobre entendimiento, sin embargo existen factores importantes que inciden en esta incluyendo el tipo y concentración de materia orgánica en el agua, el tiempo de reacción del cloro, temperatura y pH. (Williams et al., 1995; Benoit et al., 1997).

2.2 Normatividad regulatoria de SPD en aguas para consumo humano.

En 1979, bajo la Ley de agua potable y medio ambiente de EE.UU; la Environmental Protection Agency (EPA), establece un nivel máximo de contaminación para el total de trihalometanos (THM) en 100 partes por billón (ppb) para sistemas de aguas superficiales. (L.S. Clesceri, A. Greenberg AE. et al; 1998). A través de la norma CFR 40 (Parts 9, 141, and 142 National Primary Drinking Water Regulations: Disinfectants and Disinfection Byproducts;

Final Rule) esta expresa concentraciones máximas para trihalometanos totales de 0.080 mg/l, ácidos haloacéticos de 0.060 mg/l y bromuros de 0.01 mg/l. Los THM's son los subproductos de la cloración generados en mayor cantidad y se utilizan como indicadores del nivel total de subproductos de la cloración de un agua. En los últimos años diversos estudios epidemiológicos han evaluado la asociación entre la exposición a subproductos de la cloración y efectos sobre la salud humana. (Stocker KJ, Statham et al, 1997). Actualmente en Colombia la resolución 2115 de junio 22 de 2007 emitida por el ministerio de la protección social y el ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial establece un valor regulatorio para los trihalometanos en conjunto o totales de 0,2 mg/l y no establece o legisla valores para cada uno de estos compuestos; mientras que en Canadá y Estados Unidos estos contaminantes son monitoreados por separado en las plantas de tratamiento de agua potable PTAP y en las redes de distribución. A demás demanda especial atención la investigación de estos SPD sobre los efectos adversos que estos tienen sobre la salud humana. Aunque la regulación en nuestro país es reciente algunas compañías han determinado en sus planes de calidad de agua proyectar programas de monitoreo y control de estas sustancias.

2,3 Formación de SDP asociados a cofactores.

Diversas investigaciones han relacionados cofactores con la formación de SPD y especialmente THM's en los sistemas de distribución de aguas; algunos de estos cofactores se han asociado a (temperatura del agua, concentración de cloro residual, pH del agua, tiempo de residencia en el sistema y material de las tuberías utilizado en los sistemas de distribución). Según Karen C.W. and Chan et. al, (2002), estudiaron la relación entre los residuales de cloro en el agua para consumo humano y la superficie interior de las tuberías de cloruro de polivinilo PVC en los sistemas de distribución. Diferencias temporales y tiempos de residencia fueron factores importantes en la producción de THM's y las biopelículas en la superficie han tenido un mayor impacto significativo en la formación de cloroformo en volumen de agua que ha pasado por procesos de tratamiento. La adsorción de biopelículas ha sido identificado como un mecanismo superficial responsable de la eliminación de los precursores de THM's. Aunque muchas investigaciones involucran precursores específicos en la formación de THM's los cuales todavía no están claros, (Mallevalle et al. 1990; L. Hureiki et al. 1994; Pomes et al. 1999). Por otra parte recientes estudios han revelado varios aspectos en los que el ambiente de las tuberías pueden contribuir a una más compleja reacción en los sistemas. Primeramente las reacciones químicas con los materiales de las tuberías pueden comprometer reducciones microbiales eficientes (Le Chevallier et al. 1990; Hallam et al. 2001). Segundo, las biopelículas son formadas en sistemas de distri-

bución cuando las células microbiales se unen a la superficie de las tuberías y se multiplican, formando una capa lisa en la tubería. El ataque bacterial produce polisacáridos (EPS) que ayudan a anclar los microorganismos a la superficie de la tubería y el crecimiento de microorganismos como de biopelículas es soportado por un sustrato de nutrientes acumulados en un ambiente oligotrófico (Fletcher and Marshall 1982). Estudios realizados por (Volk et al. 1997; Camper et al. 1999), han mostrado que las sustancias húmicas, el principal precursor de THM's presentes en aguas para consumo, pueden convertirse en biológicos utilizables por las bacterias cuando esta son absorbidas a la superficie. Tercero, una incapacidad en mantener un residual químico permite rebrote bacterial en suministros de agua. La fijación bacterial ha sido también mostrada para proveer un mayor factor a la resistencia a la cloración y la persistencia al rebrote bacterial (Le Chevallier et al. 1988; Hallam et al. 2001). Esto podría suponer que la biopelícula podría imponer cierto impacto en la formación de THM's durante la distribución. Por lo tanto, el sistema de uso general de distribución simulada (SDS) o prueba, tal como se especifica en la norma Método 5710C (APHA et al. 1995), puede no ser adecuada para la evaluación de THM's en un sistema de distribución. La prueba estándar supone cero contribuciones del sistema de distribución de agua.

3. Materiales y Métodos

3.1 Caracterización de THM's

Se recolectaron datos de las características físico químicas de aguas empleados para el control de la calidad de estas en diferentes puntos del sistema de tratamiento y distribución de los acueductos de Bogotá, Bucaramanga, Medellín y Tunja, se organizaron y analizaron los datos de Trihalomentanos Totales para el 2009. Además de estos datos se analizaron y procesaron los parámetros de temperatura, pH, turbiedad y concentración de cloro residual encontrado en la red de los sistemas de distribución.

3.2 Análisis estadístico

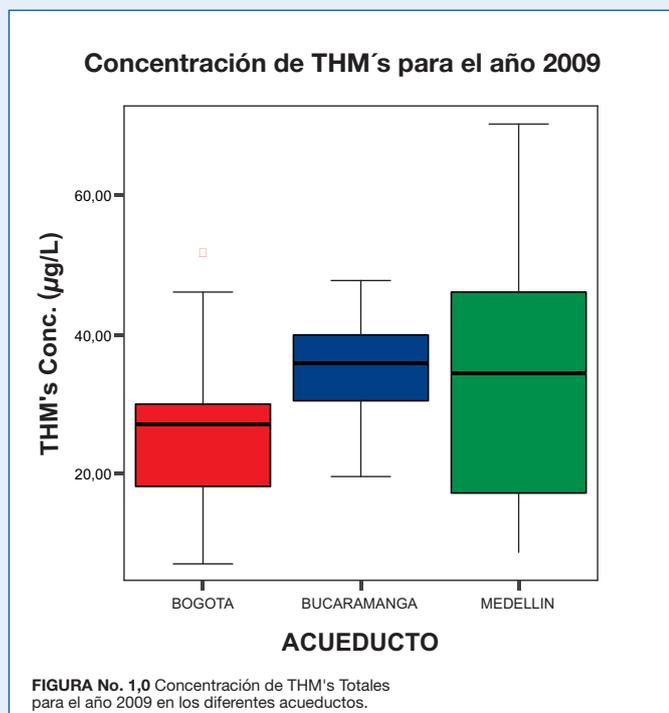
La estadística fue analizada utilizando el SPSS 15 (SPSS Inc.) y Excel (Microsoft Inc.) estos paquetes de software fueron usados para analizar la correlación entre la formación de Trihalometanos y los diferentes cofactores asociados a la formación de estos subproductos tales como temperatura, turbiedad, concentración de cloro residual y pH. One-way ANOVA fue usado para chequear los factores de interacción entre los parámetros de (temperatura, turbiedad, concentración de cloro residual y pH) y la concentración de THM's encontrada en cada uno de los acueductos. La prueba de Tukey fue utilizada para comparar todas las relaciones entre las variables y para chequear una significancia estadística de los datos procesados, para observar diferencias entre los datos analizados para este estudio el valor tomado fue de ($P=0,05$), valores

de P menores a esta cifra nos mostraran que si existen diferencias significativas y valores mayores a 0,05 indicaran que no existía diferencias significativas, para el caso de la correlación entre cada uno de los parámetros y la formación de THM's se aplico una regresión lineal la cual mostro un (model summary) que detallo un valor de R, este valor es el nivel de asociación de dos variables, ya que una regresión describe una causa efecto, para el caso de valores entre 0 y 0,5 se evalúo que la correlación de los parámetros para cada uno de los acueductos en la formación de THM's es deficiente, para valores entre 0,5 y 1,0 se asocio que la correlación de los parámetros para cada uno de los acueductos en la formación de THM's es buena.

4. Resultados y Discusión

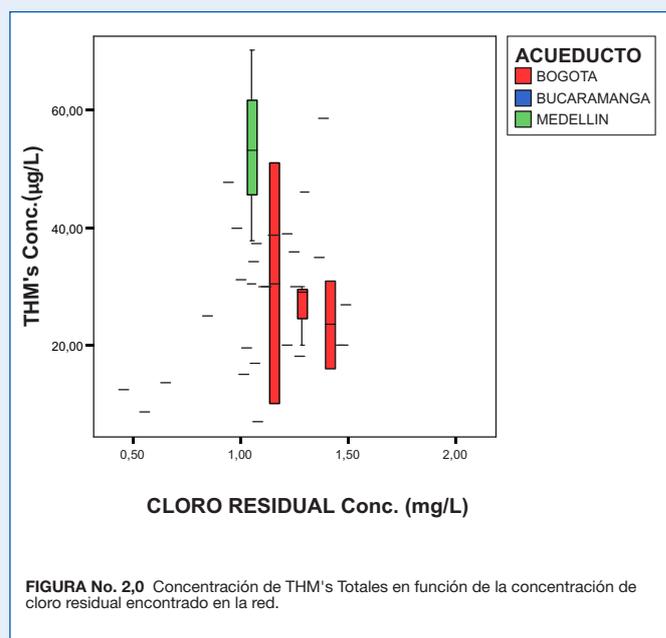
4.1 Concentración de THM's en los diferentes acueductos.

Se encontraron mayores concentraciones de THM's para los acueducto de Bucaramanga y Medellín con concentraciones medias de Trihalometanos Totales del orden de 34,85 µg/L y 34,10 µg/L y una desviación estándar de 9,52 y 19,42 respectivamente y en menor proporción se presentaron estas concentraciones para el acueducto de Bogotá con una concentración media de Trihalometanos Totales del orden de 25,61 µg/L y desviación estándar de 11,02, en la figura No 1,0 se muestra la concentración de THM's Totales para cada uno de los acueductos analizados, el acueducto de Tunja no se incluyo en este estudio ya que las concentraciones de THM's Totales no fueron detectadas según el informe de calidad de agua suministrado por la empresa prestadora del servicio.



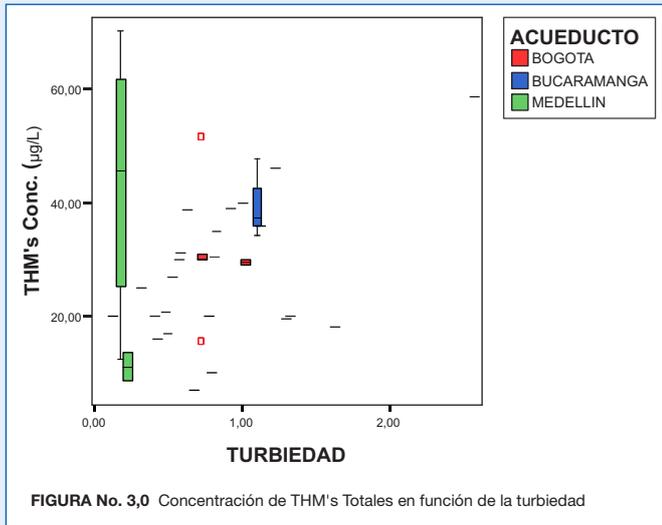
4.2 Formación de THM's en función de la dosis de cloro residual.

Realizando la regresión lineal para esta variable, encontramos que el valor de R fue 0,130 lo cual nos indica que no existe una correlación directa entre la formación de THM's y las dosis de cloro residual en la red, esto se confirma al obtener un valor de P= 0,429 en donde no existen diferencias significativas entre esta variables, en la figura No 2,0, muestra el comportamiento de la concentración de THM's con respecto al residual de cloro en la red, el acueducto que mostro mayor incremento en las concentraciones de THM's en función de la concentración residual de cloro en la red fue Medellín, seguido de Bogotá y en menor grado Bucaramanga; las concentraciones medias más elevadas se reportaron en Bogotá con un valor de 1,31 mg/L y una desviación estándar de 0,14, seguido por Bucaramanga con 1,02 mg/L y Medellín con 0,96 mg/L, estos dos últimos presentan desviaciones estándar de 0,04 y 0,41 respectivamente.



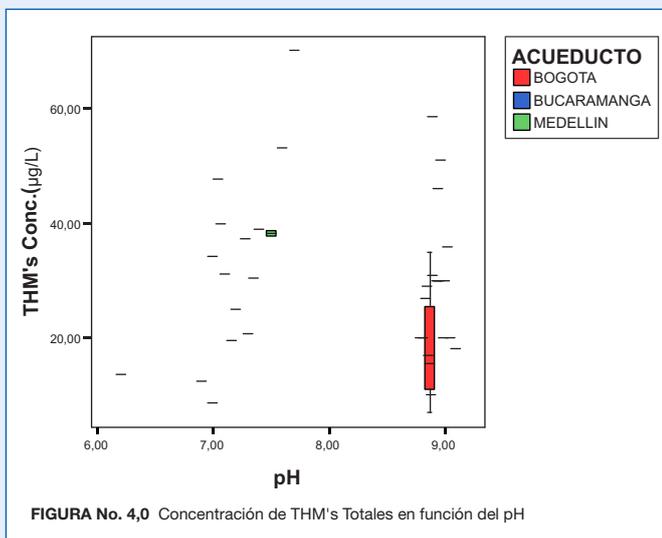
4.3 Formación de THM's en función de la turbiedad medida en la red de distribución.

Para este parámetro la correlación fue deficiente con un valor de 0,206 y una significancia de 0,208; se puede observar que a pesar de no existir una prueba directa del incremento en las concentraciones de THM's y la turbiedad, Medellín presenta las mayores concentraciones al asociarse estas con valores de turbiedad; los mayores valores de turbiedad se presentaron en el acueducto de Bucaramanga con 0,97 UNT, seguido de Bogotá con 0,86 UNT y Medellín con 0,520 UNT.



4.4 Formación de THM's en función del pH.

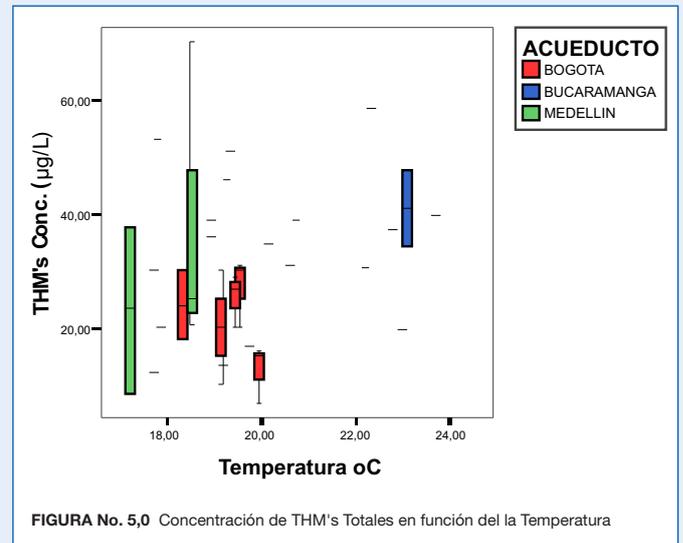
El análisis con el SPSS arroja para el pH un valor de 0,91, lo cual establece una correlación buena esto se confirma al obtener una significancia de 0,048, para lo cual el pH es un factor determinante en la formación de THM's en las redes de acueducto; rangos de pH entre 8,0 a 9,0 pueden propender al incremento de estas concentraciones, en la figura No 4,0, se muestra esta correlación para la cual los mayores valores medios de pH se encontraron en Bogotá con 9,01, seguido por Bucaramanga y Medellín con valores de 7,23 y 7,18 respectivamente.



4.4 Formación de THM's en función de la temperatura del agua.

El valor de R asociado a esta variable es de 0,18 lo cual indica una deficiencia al correlacionar temperatura y con-

centración de THM's, y la significancia esta en 0,250 con lo cual se asocia que no hay diferencias significativas entre la temperatura y la concentración de THM's, a pesar de esto en la figura No 5,0 se muestra que a temperaturas mayores de 22 oC, las concentraciones de THM's se duplican por lo cual para el acueducto de Bucaramanga resulta en las mayores concentraciones de THM's por encima de los 40 µg/L, y en menor proporción se presentan las concentraciones para los acueductos de Medellín y Bogotá.



5. Conclusiones

Las mayores concentraciones de THM's se presentan en los acueductos de Bucaramanga y Medellín respectivamente.

Las concentraciones de THM's en función del residual de cloro encontrado en la red se da para el acueducto de Medellín con valores superiores a los 50µg/L.

La turbiedad monitoreada en la red no fue un factor determinante en la formación de THM's para este estudio.

El pH del agua encontrado en los tres acueductos no incide en la formación de THM's, ya que las concentraciones permanecen iguales al variar estos valores.

A pesar de no encontrar una significancia estadística hablando, la temperatura fue uno de los parámetros más importantes en el aumento de las concentraciones de THM's en la red especialmente en Bucaramanga donde están presentaron valores superiores a 40 µg/L, mientras que a menores temperaturas como las presentadas en Bogotá y Medellín las concentraciones fueron del orden de 20 a 25 µg/L.

Según la resolución 2115 de 2007 la cual regula Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias como los THM's esta exige un contenido máximo en las redes de acueducto de 0,20 mg/L o 200µg/L, para lo cual y según los datos suministrados por los diferentes acueductos todos cumplen con esta norma ya que presentan valores muy bajos de estos compuestos con valores de 34,85 µg/L y 34,10 µg/L, para Bucaramanga y Medellín y de 25,61 µg/L para Bogotá.

En comparación con la norma Salvadoreña obligatoria NSO 13.07.01.04 Agua. Agua Potable, la concentración de THM's cumpliría para los tres acueductos ya que esta exige 100 µ/L de THM's.

Según la Norma Estadounidense No 40 CFR Parts 9, 141, and 142, National Primary Drinking Water Regulations: Disinfectants and Disinfection Byproducts; Final Rule, emitida por la Environmental Protection Agency (EPA), se establece un valor máximo de THM's de 0,080 mg/L, con lo cual se estaría cumpliendo con este estándar para los tres acueductos.

REFERENCIAS

- Benoit Rieger, Geneviève Hubert, Patrick Biette, Aline Berthelin. (1997). Not only training but also exposure to chlorinated compounds generates a response to oxidative stimuli in swimmers. *Toxicology and Industrial Health*.
- Cantor ; Richard J. Bull; Linda Birnbaum; Kenneth P; Joan B. Rose; Byron E. Butterworth; Rex Pegram and Juoko Tuomisto. (1987). Water Chlorination: Essential Process or Cancer Hazard?. Health Risk Assessment Department, Battelle Pacific Northwest Laboratories Richland, Washington 99352 Health Effects Research Laborator, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park North Carolina 27711 National Cancer Institute Bethesda.
- Camper F Codony; J Morato, J Mas. (1999). Role of discontinuous chlorination on microbial production by drinking water biofilms. Department of Civil Engineering, Dalhousie University, 1360 Barrington Street, Halifax, NS, Canada B3J 2X4.
- D. M. Freedman, K. P. Cantor, N. L. Lee, L.-S. Chen, H.-H. Lei, C. E. Ruhl and S. S. Wang. (1997). Bladder cancer and drinking water: a population-based case-control study in Washington County, Maryland (United States). *Cancer Causes and Control* Volume 8, Number 5.
- Fletcher and Marshall, 1982. Effect of surface free energy on the adhesion of biofouling and crystalline fouling. Institute for Thermodynamics and Thermal Engineering, University of Stuttgart Institute for Technical Thermodynamics, German Aerospace Centre, D-7000 Stuttgart, Germany.
- Hallam; Rizzo Luigi. (2001). Drinking Water Disinfection: Microbial Risk and Disinfection by-Products. Department of Civil Engineering. Salerno University Italy.
- Karen C.W. Chan, Donald S. Mavinic, and John A. Brereton. (2002). Trihalomethane formation in drinking water and production within a polyvinyl chloride pipe environment. Environmental Engineering Group, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, BC V6T 1Z4, Canada.
- LS Clesceri, AE Greenberg, AD Eaton - March. (1998). Standard Methods for examinations of water and waste water 20th edition.
- L. Hureikia, J.P. Crouéa and B. Legube. (1994). Chlorination studies of free and combined amino acids. Laboratoire Chimie de l'Eau et des Nuisances URA CNRS 1468, École Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, Université de Poitiers, 40 avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers Cedex, France.
- Le Chevallier; Costerton; MacDonald. (1990). Comparison of the Efficacy of Free Residual Chlorine and Monochloramine against Biofilms in Model and Full Scale Cooling Towers. Department of Biology, Faculty of Science, Istanbul University, Turkey.
- Leidholdt, Ralph. (1982). Chlorine - 'Special Agent' for Disinfecting Water. *OPF*, Vol. 8 Iss. 9, September 1982, Page Range 1, 6-7, 3 Pages.
- Lorraine C; Backer; Manoranjan VS, Campbell TJ. (2000). Water Well Sustainability in Ontario. Prepared for the Ontario Ministry of the Environment Sustainable Water Well Initiative Final Report.
- Mallevalle; Chan, DS Mavinic, JA. (1990). Trihalomethane formation in drinking water and production within a polyvinyl chloride pipe environment. *Journal of Environmental Engineering and Science*.
- Match, J. E., & Birch, J. W. (1987). *Guide to successful thesis and dissertation* (4th ed). New York: Marcel Dekker.
- Mc Geehin; KP Cantor, CF Lynch, M Hildesheim. (1993). Drinking Water Source and Chlorination Byproducts I. Risk of Bladder Cancer, *Epidemiology* January 1998, Volume 9 Number 1.
- Rodriguez Manuel J., Sérodes Jean-B., Levallois Patrick, and Proulx François. (2003). Chlorinated disinfection by-products in drinking water according to source, treatment, season, and distribution location. Laval University Canada.
- Olin; Filser; Jo; Maxwell; McKone. (1998). Partition coefficients for the trihalomethanes among blood, urine, water, milk and air. Department of Environmental Health Sciences, University of Michigan, 109 Observatory Drive, Ann Arbor, MI 48109-2029, USA.
- Pomes, Michael L.; Green, W. Reed; Thurman, E. Michael; Orem, William H; Lerch, Harry E. (1999). DBP Formation Potential of Aquatic Humic Substances. *Journal AWWA*, Vol. 91 Iss. 3, March 1999, Page Range 103-115, 13 Pages.
- Stocker, KJ, Statham, J., Howard, WR and Proudlock, R.J. (1997). Risk assessment case study-Chloroform and related substances. *Food and Chemical Toxicology*, Volume 38, Pages S91-S9.
- Volk C., Roche P., Romer C., Paillard H. and Joret J.G. (1997). Ozone enhanced removal of natural organic matter from drinking water sources. University of Colorado at Boulder, Boulder, CO 80309, U.S.A.
- WD King, LD Marrett. (1996). Case-control study of bladder cancer and chlorination by-products in treated water (Ontario, Canada).
- Williams David T; Benoit M. Frank; Guy L. Label. (1995). Trends in levels of disinfection by-products. *Environmetrics*, Volume 9, Issue 5, pages 555-563.
- Wilkes; S Haddad; GC Tardif R. (1996). Development of physiologically based toxicokinetic models for improving the human indoor exposure assessment to water contaminants: trichloroethylene and trihalomethanes. D partement des sciences biologiques, TOXEN, Universit du Qu bec Montral, Montral, Canada.