

Artículo Científico

Determinación de la presencia de trihalometanos totales (TTHMS) como subproducto de la desinfección en el proceso de potabilización de agua superficial para consumo humano

Alvaro Francisco Ramírez Vásquez
Consultor independiente

Dirección para recibir correspondencia: ravalvarof@gmail.com

Zenón Much Santos

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, ERIS-USAC

Recibido 08.06.20 Aceptado 10.09.2020

Resumen

En este estudio se examinaron los efectos del pH, cloro residual y materia orgánica (sólidos disueltos) como agentes precursores en el desarrollo de trihalometanos totales (TTHMS) en agua tratada para consumo humano. La base experimental se fundamenta en la presencia de TTHMS en concentraciones mayores a 80 µg/L de fuentes que abastecen a la Ciudad de Guatemala y que potabilizan agua proveniente de flujos superficiales. Se identificó una relación directa entre el nivel de pH, cloro residual, tiempo de contacto, conductividad eléctrica y sólidos disueltos en la formación de TTHMS, acrecentando la producción cuando los niveles de los anteriormente son altos. Se evaluaron tres distintas fuentes de agua en las que se realizaron 7 análisis por muestra extraída, de la información producida se analizaron los valores promedios en cada una de las muestras, presentando concentraciones de 124.86 µg/L, 127.14 µg/L y 11.14 µg/L en las fuentes A, B y C respectivamente, lo que evidencia que dos superan los valores fronteras por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos USEPA (80 µg/L). Las concentraciones de TTHMS obtenidas sugieren que existen concentraciones de precursores cancerígenos por arriba del valor recomendado en el agua para consumo en las zonas estudiadas, por lo tanto, existe la posibilidad de que esté repercutiendo negativamente en la salud de las personas.

Palabras clave: Precursores, trihalometanos totales, desinfección, subproductos, potabilización.

Abstract

This research examined the effects of pH, residual chlorine and organic matter (dissolved solids) as precursor agents in the development of total thihalomethanes (TTHMS) in treated water for human consumption. The experimental base is founding on the presence of TTHMS at concentrations greater than 80 µg/L from sources supplying Guatemala City and watering water from surface flows. A direct relationship was identified between pH level, residual chlorine, contact time, electrical conductivity and dissolved solids in the formation of TTHMS, increasing production when levels of those previously high. Three different water sources were evaluated in which 7 analyses were performed per sample extracted, of the information produced, the average values in each of the samples were analyzed, presenting concentrations of 124.86 µg/L, 127.14 µg/L, and 11.14 µg/L at sources A, B, and C respectively, which shows that two exceed the border values by the U.S. Environmental Protection Agency USEPA (80 g/L). The concentrations of TTHMS obtained suggest that there are concentrations of carcinogenic precursors above the recommended value in water for consumption in the areas studied, therefore there is a possibility that it is negatively impacting human health.

Key words: Precursors, total trihalomethanes, disinfection, by-products, water treatment

Introducción

La Ciudad de Guatemala se abastece en un 42.49% de fuentes superficiales (Balance general 2017) que

pasan a través de un proceso de tratamiento para asegurar un consumo sanitariamente seguro. La Empresa Municipal de Agua, EMPAGUA, cuenta

actualmente con cuatro plantas de tratamiento de agua potable de fuentes superficiales activas: Lo de Coy, Santa Luisa, El Cambray y Las Ilusiones. Cada sistema de tratamiento presenta una etapa de desinfección en la que se utiliza cloro para garantizar la eliminación de patógenos, quedando sujetas a la posible formación de subproductos de la desinfección, y por lo tanto a la presencia de TTHM en el agua.

El agua superficial transporta múltiples minerales, los cuales son aportados por el suelo y arrastrados por la erosión que genera la naturaleza dinámica del recorrido, obteniendo en mayores concentraciones sustancias húmicas provenientes de las características de formación del suelo, siendo estos unos de los mayores precursores de los subproductos de la desinfección.

Como respuesta a la creciente tendencia a nivel mundial de la necesidad de conocimiento sobre la existencia de precursores cancerígenos presentes en el agua de consumo humano, se pretende determinar las concentraciones de TTHMS que se pueden estar produciendo en procesos de potabilización de fuentes superficiales y evaluar si están siendo desarrolladas en concentraciones que representen daños potenciales a la salud de las personas.

Antecedentes

Unos de los primeros estudios dirigidos a evaluar la posible relación entre el cáncer y la calidad del agua potable se realizaron en Estados Unidos en la década de 1970 (Ram et al., 1990), los cuales trataron de investigaciones descriptivo-geográficas y epidemiológico-analíticas. Ambos estudios presentan considerables diferencias en su diseño y metodología, lo cual quiere decir que se limita la comparación de resultados y posibles asociaciones de casos de cáncer con el consumo de agua clorada.

En España, de marzo de 1991 a febrero de 1992, se informó que en los países Vascos fueron detectadas concentraciones promedio dentro del rango de 3.6 a 7.4 $\mu\text{g/L}$ de Trihalometanos Totales (THMT). La mayor concentración se hallaba en el dibromoclorometano, seguido por el diclorobromometano y el cloroformo (Ibarluzea et al., 1994).

En Japón, de 1994 a 1995, se realizó una investigación sobre la incidencia de Trihalometanos (THM) en la línea de abastecimiento de agua potable a la población. Los resultados describieron concentraciones en el rango de 7 a 72 $\mu\text{g/L}$ de THMT. Los compuestos con mayor incidencia detectados fueron el cloroformo seguido del bromodichlorometano (Adachi y Kobayashi, 1995).

En México, de octubre de 1993 a septiembre de 1994, se analizaron niveles de THM en fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano en 15 estaciones de Cancún, Quintana Roo, y en Guadalajara, Jalisco. Las concentraciones detectadas varían en el rango de 0.4 a 75.7 $\mu\text{g/L}$, con una mayor concentración promedio de bromodichlorometano de 27.6 $\mu\text{g/L}$ (Leal-Asencio et al., 1999)

En Estados Unidos, en 1995, la Agencia de Protección Ambiental (US EPA por sus siglas en inglés) detectó doce sistemas de abastecimiento, en diferentes estados, que frecuentemente sobrepasaban el límite máximo permisible de 100 mg/L de THMT regulado por dicha institución (USEPA, 1996).

En Venezuela, del 2000 al 2001, se realizó un estudio sobre la concentración de THM en el agua para consumo humano suministrada por las redes de distribución de los dos principales sistemas de potabilización de agua del estado de Carabobo. Se encontraron concentraciones de THMT desde 47.84 hasta 93.23 $\mu\text{g/L}$, con una alarmante concentración arriba de los 80.00 $\mu\text{g/L}$ regulados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, confirmando la existencia del riesgo a sufrir efectos adversos para la salud como consecuencia del consumo de agua desinfectada con cloro (Sarmiento et al., 2003).

En España, en 2008, un estudio recopilatorio de los efectos de los THM en la salud detalló la posible relación detectada entre subproductos del cloro y el riesgo de desarrollar cáncer de vejiga y colon. Los resultados fueron inconclusos, sin embargo, la misión del estudio se concentró en resaltar la necesidad de normalización, del diseño y metodología, de esta clase de estudio para que pueda existir un mejor manejo de la información que permita identificar cualquier tipo de correlación entre ambas variables, y así, brindar

validez a estudios realizados en futuras investigaciones (Sánchez, 2008).

En Nicaragua, en 2010, se llevó a cabo un estudio de la fracción de materia orgánica de mayor remoción en el proceso coagulación-floculación en agua superficial, en el cual se encontraron concentraciones de THM del orden de 89 a 166 µg/L, en aguas para consumo humano luego de ser desinfectadas utilizando productos del cloro (Tapia et al., 2011).

En la ciudad de Pamplona en España, en 2011, se llevó a cabo un estudio sobre la presencia de Trihalometanos en aguas para consumo humano donde se expone su toxicidad y, los posibles daños que representa a la salud la exposición en concentraciones altas de THM. Se detalla el caso del bromodichlorometano y el bromoformo, los cuales fueron declarados como parte del grupo 2B, clasificación que se le atribuye a sustancias cancerígenas en humanos por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer, resaltando que los antecedentes estudiados señalan evidencia de cancerogenicidad en experimentos con animales (Hernández et al., 2011)

En Colombia, de 2013 a 2014, se evaluó la presencia de THMT, y otras sustancias, presentes en agua para consumo en las poblaciones de Chinú y Corazal. La mayor concentración detectada fue de 7.36 µg/L de cloroformo (Hernández y Marrugo, 2016).

Subproductos de la desinfección

Tabla 1. THMS más comunes

Fórmula molecular	Nombre IUPAC	Nombre común	Otros nombres
CHCl3	Triclorometano	Cloroformo	--
CHBrCl2	Bromodichlorometano	--	BDCM
CHBr2Cl	Dibromoclorometano	--	DBCM
CHBr3	Tribromometano	Bromoformo	--

Fuente: Calderón, J. Et. Al. Subproductos halogenados de la cloración en el agua de consumo público. 2001.

Factores que influyen en la formación y concentración de TTHMS

La tasa de formación y concentración final de THMS en el proceso de desinfección depende de seis factores principales:

- **Temperatura:** Manteniendo el nivel de pH y la dosis de cloro, aumentar la temperatura incrementa la posibilidad de formación del cloroformo.
- **Efecto del nivel de pH:** Debido a la acción catalítica del haloformo, al aumentar el valor del pH del agua mayor será la cantidad de THMS.
- **Cloro residual:** La concentración del cloroformo aumenta directamente con el residual de cloro.
- **Precusores orgánicos o sustancias húmicas:** Cuando el agua transporta grandes cantidades de derivados del humus, se incrementa sustancialmente la posibilidad de formación de THMS.
- **Concentración de bromo en el agua:** El bromo representa un constituyente natural en el agua, reacciona en presencia del cloro para formar ácido hipobromoso y a su vez este en precursores orgánicos.
- **Tiempo de contacto del cloro:** A mayor tiempo de contacto mayor formación de THMS, debido al efecto residual del cloro muy probablemente en las líneas de distribución seguirán formándose al entrar en contacto con materia orgánica.

Regulación y concentraciones permitidas

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece valores guías recomendados para las concentraciones máximas individuales de cada uno de los THMS en el agua para consumo humano. Además, en la primera revisión de la Normas Guatemaltecas Obligatorias COGUANOR NGO 29001: Agua potable, se han establecido valores de concentraciones conocidos como Límite Máximo Permisible (LMP) para los productos de la desinfección, aspecto posteriormente retirado en la actualización de la misma en su versión de Norma Técnica Guatemalteca

COGUANOR NTG 29001: Agua para consumo humano.

A pesar que ha sido normado las concentraciones máximas individuales de THMS en el agua, ninguna de las mencionadas anteriormente define un límite máximo para la cantidad de TTHMS, las guías de la OMS proponen una ecuación para definir un límite en base a los criterios locales en contraste con los establecidos por la misma OMS, sin embargo las normas de calidad de agua para consumo de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos USEPA si definen un criterio para la concentración máxima de TTHMS, por lo que han sido seleccionadas para la aplicación en el presente estudio.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de ambas normativas.

Tabla 2. Valores guía para THMS en agua para consumo

Parámetro	OMS LMP (µg/L)	EPA LMP (µg/L)
Bromoforno	100	60
Bromoclorometano	100	60
Bromodichlorometano	60	60
Cloroformo	300	--
TTHMs	--	80

Fuente: Guidelines for Drinking-water Quality, WHO. National Primary Drinking Water Regulations, EPA.

Prevención de la formación de TTHMS

Existen técnicas tradicionales que pueden ayudar en la disminución de la formación de TTHMS que no sólo disminuyen los niveles de TTHMS, sino que además ayudan a disminuir la carga microbiana en el agua para consumo humano. Además, el almacenamiento de agua puede llegar a disminuir los TTHMS por su volatilización, siendo mayor en recipientes que no están cubiertos a diferencia de aquellos cubiertos.

Tabla 3- Reducción de los niveles de THMS en aguas mediante el empleo de distintas técnicas

Técnica	Reducción de TTHM (%)
Ebullición (1-5 min)	68-98
Tras ebullición > 5 min	83 (cloroformo)
Filtros domésticos (de carbón activado o resina de intercambio iónico)	47
Filtros de carbón activado	93-99

Fuente: Hernández Et. Al. "Trihalometanos en aguas de consumo humano". 2011.

Metodología

Se extrajeron muestras de tres sitios distintos, tomando de aquí en adelante la denominación de A, B y C para facilitar su referencia. Se aplicó la distribución de probabilidad binomial para determinar el número de muestras.

Los parámetros de medición fueron los siguientes:

1. Trihalometanos totales TTHMS
2. Potencial de hidrógeno
3. Temperatura
4. Conductividad eléctrica
5. Sólidos disueltos
6. Cloro residual

Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini de Molina" de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Siguiendo el procedimiento planteado del método HATCH 10132: "calentamiento indirecto" para la determinación de pruebas de potencial formación de THM en muestras de agua potable (Febrero de 2020).

Resultados

La Tabla 4 describe los resultados promedio obtenidos de las 3 fuentes analizadas, seguido se presentan seis gráficas que describen el comportamiento de los parámetros estudiados en cada una de las fuentes comparadas con los valores frontera propuestos por la EPA.

Tabla 4. Resultados promedio de fuentes analizadas

FUENTE	A	B	C
Cloro Residual	0.33	0.5	0.2
pH (Unid)	6.31	6.4	6.2
C.E. (µS/cm)	328.2	326.45	140.99
S.D. (mg/L)	164.1	163.22	70.5
T (°C)	20.21	20.07	20
TTHMS (µg/L)	124.86	127.14	11.14

Figura 1. Comportamiento del cloro residual

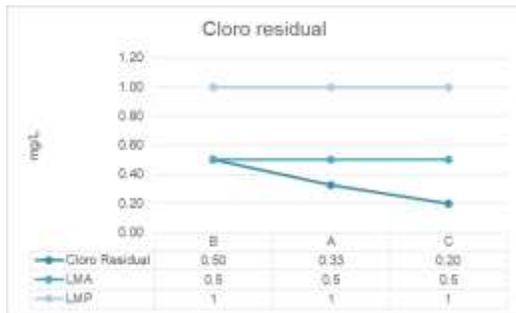


Figura 2. Comportamiento del pH

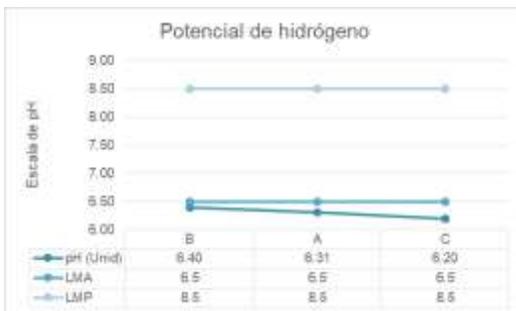


Figura 3. Comportamiento de la C.E.

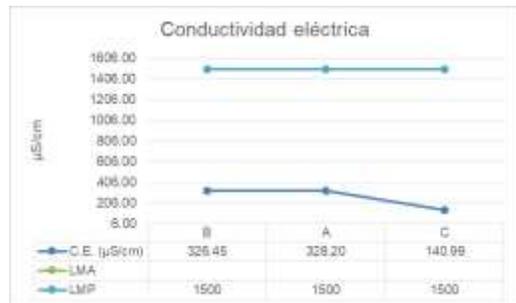


Figura 4. Comportamiento de la concentración de S.D.

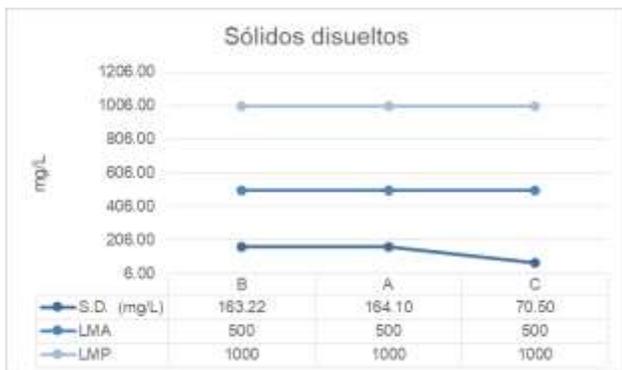
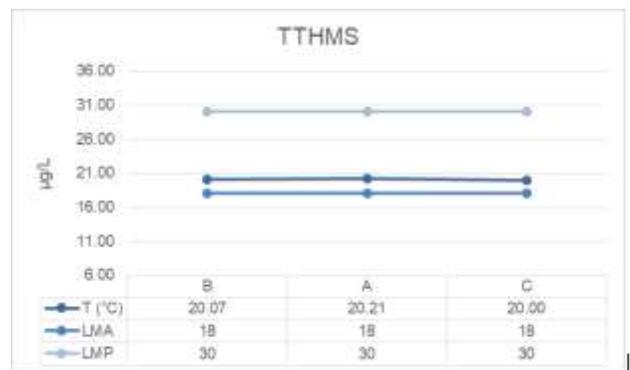


Figura 5. Comportamiento de la temperatura



Figura 6. Comportamiento de la concentración de TTHMS



Análisis de resultados

Los resultados fueron comparados con los valores frontera establecidos en las normas y regulaciones de agua para consumo humano de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos USEPA. Cabe aclarar que actualmente Guatemala cuenta con la norma COGUANOR NTG 29001 Agua para consumo humano (agua potable): especificaciones, que no contempla los subproductos de la desinfección, y que la norma COGUANOR NTG 29005 Agua envasada para consumo humano, por su naturaleza limita la aplicabilidad de sus criterios para los alcances que se pretenden abarcar en el estudio. A continuación se presenta un grupo de gráficos que remarcan la incidencia de los parámetros estudiados con la formación de TTHMS.

Las muestras fueron obtenidas después de pasar un proceso de tratamiento de agua para consumo humano y acorde a los resultados obtenidos, dos fuentes de todas las analizadas sobrepasan los límites

establecidos para la calidad del agua de consumo humano propuestas, lo que demuestra que existen problemas de generación de subproductos de la desinfección en el proceso de potabilización que llevan a cabo.

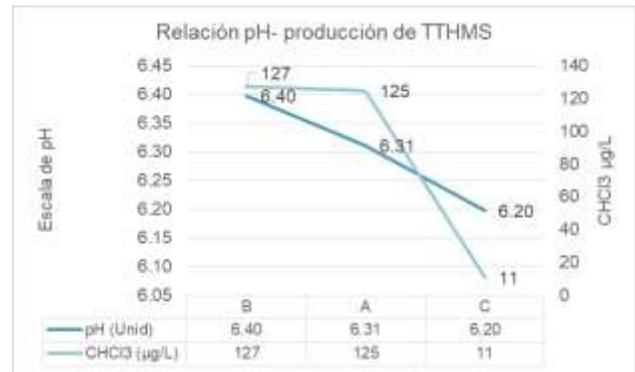
Figura 7. Relación cloro residual – producción de TTHMS



Los niveles de cloro residual están plasmados en la Figura 1 y puede observarse que no están dentro de los valores frontera, sin embargo tal hecho no es tan contraproducente en el análisis de esta investigación si se toma en cuenta que algunas de las muestras fueron tomadas en puntos dentro de la red de distribución y que por la misma naturaleza del agua entubada, el movimiento que atraviesa el fluido dentro de todo su recorrido de conducción hasta su consumo afecta directamente al cloro residual libre por aspectos como la suciedad en la tubería, infiltraciones, entre otros.

De todos los parámetros considerados se puede apreciar en la Figura 2 que el potencial de hidrógeno se encuentra fuera de norma, sin embargo la diferencia no resulta tan abrupta como para creer que se pueda tener un problema de acidez.

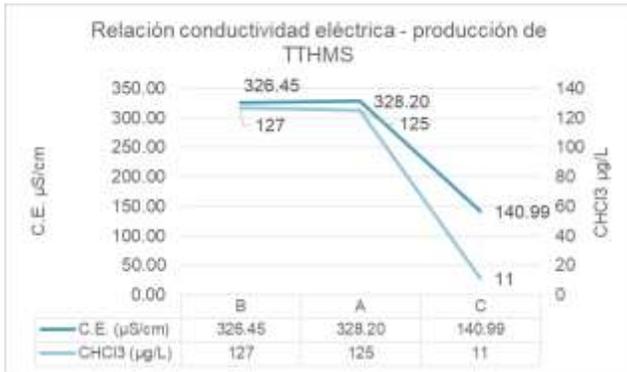
Figura 8. Relación pH – producción de TTHMS



Otro punto importante a resaltar puede observarse en la Figura 7, la cual muestra una relación directa entre la concentración del cloro residual y la formación de TTHMS. Las muestras examinadas de la Fuente B tuvieron una mayor concentración de cloro residual y en los análisis de laboratorio se obtuvieron también las concentraciones más altas de formación de TTHMS. Sabiendo que la formación de subproductos de la desinfección con respecto a la cantidad de cloro suministrada para la desinfección del agua depende de factores como la materia orgánica total (carbono orgánico disuelto), dosis y tiempo de contacto. La Fuente C por el contrario obtuvo la menor concentración de cloro residual y menor concentración de formación de TTHMS.

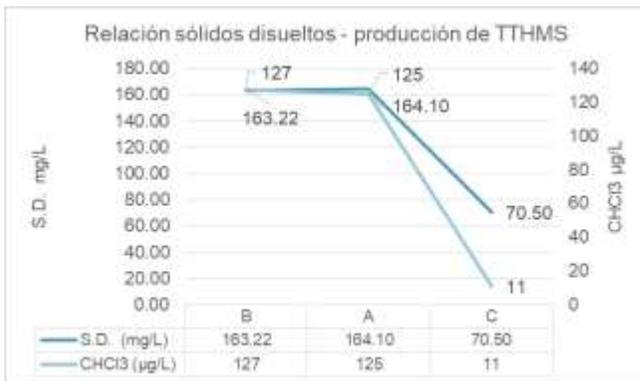
La Figura 8 muestra una relación directa entre la formación de TTHMS y el nivel del potencial de hidrógeno, tal como indica la teoría, la tasa de formación de subproductos de la desinfección se ve directamente ligada al nivel de pH y en este caso se puede afirmar que la formación de cloroformo se incrementa a mayores valores de pH.

Figura 9. Relación C.E. – producción de TTHMS



Los niveles de formación de TTHMS representan riesgos potencialmente significativos, sin embargo no existen antecedentes ni indicios para pensar que el agua de consumo puede estar contribuyendo a la formación de compuestos cancerígenos y que ello signifique daños directos en la salud de la población que está siendo abastecida de las fuentes de estudio, sin embargo, es recomendable tomar acciones dentro del proceso de potabilización que permitan la reducción y cumplimiento de estándares de calidad, de esta manera reduciendo la posibilidad de afecciones en la población debido al consumo de agua con presencia de TTHMS.

Figura 10. Relación S.D. – producción de TTHMS



Se han tocado los precursores más importantes en la formación de subproductos de la desinfección, sin embargo también es importante aclarar que las condiciones del sistema de conducción y distribución del agua potable afectan directamente en la formación de THMS, por lo que se vuelve necesario tener un monitoreo constante de la formación de THMS en

distintos puntos dentro de la red de distribución y no únicamente en tanques de distribución.

Conclusiones

Se comprobó parcialmente la validez de la hipótesis al obtener concentraciones de TTHMS de 125 µg/L y 127 µg/L en las fuentes A y B respectivamente, que se encuentran por encima del valor frontera establecido en las normas y regulaciones de la calidad de agua para consumo humano propuestas por la USEPA (80.00 µg/L), por otro lado la fuente A con una concentración de 11 µg/L se encuentra dentro de la norma, por lo cual no aplica el criterio de la hipótesis planteada.

Se comprobó que el cloro residual, pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos y temperatura guardan una relación directa que impacta en la generación de trihalometanos, siendo mayor la producción a medida que mayor sean dichos parámetros.

Se demostró que se están generando TTHMS en el proceso de potabilización del agua proveniente de fuentes superficiales, y que dos de los puntos examinados no cumplen la normativa de calidad del agua potable de la USEPA, por lo que existe la posibilidad de que la formación de TTHMS esté afectada negativamente la salud de las personas que consumen agua provenientes de las fuentes analizadas.

La manera más efectiva de reducción de TTHMS en el ciclo de tratamiento de agua para consumo humano es la inclusión de una etapa de filtración con carbón activado posterior a la desinfección.

Por su volatilidad la ebullición representa la manera más efectiva para reducir la concentración de TTHMS en agua potable, por lo que representa una solución inmediata para tratar el agua en los hogares en donde se presenten altas tasas de generación.

Referencias

Andreola, R., Mannigel, A., De Souza, G., Teixeira, T., Schmi, E., Jussara, R., . . . Manesco. (2018). Tratamientos de agua, subproductos de la cloracion. Control de subproductos de desinfección en agua potable. Revista de Ingeniería Ambiental.

EPA, E. P. (1997). Research Plan for Microbial Pathogens and Disinfection By-Products in Drinking Water. Research Plan for Microbial

Pathogens and Disinfection By-Products in Drinking Water. EPA.

- Evlampidou, L. F.-R.-R.-L. (2020). Trihalomethanes in Drinking Water and Bladder Cancer Burden in the. Trihalomethanes in Drinking Water and Bladder Cancer Burden in the. *ehp Environmental Health Perspectives*, UE.
- Krasner, S. W. (1999). Formation and Control of Disinfection By-Products in Drinking Water. Formation and Control of Disinfection By-Products in Drinking Water. American Water Works Association.
- OMS. (2011). Guía para la calidad de Agua de Consumo Humano. Ginebra.
- Vallejo-Vargas, O. I., Beltrán, L., Franco, P., Montoya-Navarrete, C. H., Alzate Rodríguez, E. J., & Reyes, H. (2015). Determinación de trihalometanos en aguas de consumo humano por microextracción en fase sólida-cromatografía de gases en Pereira, Colombia . Bogotá: Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.