

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural**

**Grado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos**

**TRIHALOMETANOS EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO Y EFECTOS EN LA  
SALUD, PROBLEMÁTICA EN LAS INDUSTRIAS ALIMENTARIAS Y  
TRATAMIENTOS ALTERNATIVOS DE DESINFECCIÓN DEL AGUA.**



**Autora: Esther Alegre Calvo**

**Tutora: María Luisa Gras Romero**

Curso académico: 2020-2021

Valencia, 5 de Julio de 2021

# TRIHALOMETANOS EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO Y EFECTOS EN LA SALUD, PROBLEMÁTICA EN LAS INDUSTRIAS ALIMENTARIAS Y TRATAMIENTOS ALTERNATIVOS DE DESINFECCIÓN DEL AGUA

## **Resumen:**

La desinfección del agua con cloro como técnica estándar de tratamiento ha disminuido en gran cantidad la mortalidad por enfermedades infecciosas y es considerado uno de los mayores avances en la salud pública. El cloro además de producir una acción desinfectante residual, genera subproductos de desinfección (SPD) al reaccionar con la materia orgánica natural presente en el agua. Más de 700 subproductos han sido descubiertos y entre los más investigados se encuentran incluidos los trihalometanos (THM), los ácidos haloacéticos (HAA), los haloacetónitrilos y halocetonas.

Los THM que se encuentran en el agua de consumo humano son el cloroformo, el bromodiclorometano (BDCM), el dibromoclorometano (DBCM) y el bromoformo. El cloroformo es el THM más abundante y acostumbra a ser el principal subproducto de la desinfección que se encuentra en el agua clorada. Estos SPD pueden incorporarse al cuerpo humano por diversas vías: ingestión de agua del grifo, inhalación de los THM evaporados y absorción dérmica. Independientemente de las actividades diarias de consumo de agua, el baño o la ducha, el baño en la piscina también puede contribuir a la exposición total a THM.

La presencia de THM en el agua de consumo humano ha suscitado en los últimos años un creciente interés desde la perspectiva de la salud pública, numerosos estudios epidemiológicos han sugerido la existencia de una posible relación entre la exposición a largo plazo a subproductos de la cloración y un mayor riesgo de cáncer y un potencial efecto adverso en el sistema reproductivo.

En el presente trabajo se analizará mediante una búsqueda bibliográfica los efectos de los trihalometanos para la salud humana así como su problemática en las IIAA, como es el caso de los productos de cuarta gama.

Debido a las bajas concentraciones de los THM's tanto en las aguas naturales como en las aguas de consumo humano, del orden de ng/L a µg/L, se precisan procedimientos analíticos muy sensibles tanto para su extracción como para su determinación y por lo tanto es un aspecto que también se aborda en el presente trabajo.

El trabajo también tiene como objetivo analizar las diversas estrategias alternativas ecológicas e innovadoras de tratamientos de desinfección del agua y otro tipo de productos que eviten este problema epidemiológico.

**Palabras clave:** subproductos de desinfección, trihalometanos, agua de consumo humano, productos de cuarta gama, cloroformo, cáncer, sistema reproductivo, procedimientos analíticos muy sensibles, tratamientos alternativos.

**Autora:** Alumna: Dña. Esther Alegre Calvo

**Tutor Académico:** Prof. Dña. María Luisa Gras Romero

Valencia, 5 de Julio de 2021

## TRIHALOMETHANES IN DRINKING WATER AND HEALTH EFFECTS, PROBLEM IN FOOD INDUSTRIES AND ALTERNATIVE WATER DISINFECTION TREATMENTS.

### **Abstract:**

The disinfection of water with chlorine as a standard treatment technique has greatly reduced mortality caused by infectious diseases and it is considered one of the best breakthroughs in public health. In addition to producing a residual disinfectant action, chlorine generates disinfection by-products (DBP) by reacting with the natural organic matter present in the water. More than 700 by-products have been discovered and among the most researched are trihalomethanes (THM), haloacetic acids (HAA), haloacetonitriles and halo ketones.

THM found in drinking water are chloroform, bromodichloromethane (BDCM), dibromochloromethane (DBCM) and bromoform. Chloroform is the most abundant THM and is usually the main by-product of disinfection found in chlorinated water. THM can be incorporated into the human body in a variety of ways: ingestion of tap water, inhalation of evaporated THM's and dermal absorption. Regardless of daily water consumption activities, the shower and swimming in the pool can also contribute to total exposure to THM.

The presence of THM in drinking water has aroused in recent years a growing interest from a public health perspective; numerous epidemiological studies have suggested a possible link between long-term exposure to chlorination by-products and increased cancer risk and a potential adverse effect on the reproductive system.

In this paper, the effects of trihalomethanes on human health will be analysed through a bibliographic search, as well as their problems in the Food Industries, as is the case of fresh-cut products.

Due to the low concentrations of THM's in both, natural waters and human consumption waters, in the order of ng/L to µg/L, very sensitive analytical procedures are needed, both for its extraction and for its determination, and therefore it is an aspect that is also addressed in this paper.

The work also aims to analyse the various ecological and innovative alternative strategies of water disinfection treatments and other types of products that avoid this epidemiological problem.

**Keywords:** disinfection by-products, chlorine, trihalomethanes, drinking water, fresh-cut products, chloroform, cancer risk, reproductive system, sensitive analytical procedures, alternative treatments.

## **ÍNDICE**

- 1. Introducción**
- 2. Objetivo**
- 3. Materiales y métodos**
- 4. Fuentes de exposición a los trihalometanos**
- 5. Toxicidad: Efectos en la salud**
- 6. Problemática en las II.AA.**
- 7. Determinación analítica de trihalometanos**
- 8. Tratamientos alternativos para evitar/reducir su presencia**
- 9. Conclusión**
- 10. Referencias bibliográficas**
- 11. Anexos**

## 1. Introducción

La desinfección del agua con cloro como técnica estándar de tratamiento ha disminuido en gran cantidad la mortalidad por enfermedades infecciosas y es considerado uno de los mayores avances en la salud pública.

El cloro además de producir una acción desinfectante residual, genera subproductos de desinfección (SPD) al reaccionar con la materia orgánica natural presente en el agua. Más de 700 subproductos han sido descubiertos hasta la fecha y entre los más investigados se encuentran incluidos los trihalometanos (THM), los ácidos haloacéticos (HAA), los haloacetosnitrilos y haloacetos.

El precursor principal de los SPD es la materia orgánica natural (MON), la cual es definida como una matriz compleja generada por residuos agrícolas (ácidos húmicos y fúlvicos) y ganaderos y, en menor proporción, por vertidos urbanos. La concentración de MON puede variar en función del origen de las aguas y afecta significativamente en algunos aspectos del tratamiento de las aguas como el rendimiento de los procesos de oxidación, coagulación y adsorción que son aplicados para la desinfección y estabilidad biológica ( [Hernández et al., 2011](#)). Como resultado, esta MON afecta a la calidad del agua potable.

Los THM se producen cuando tres de los cuatro hidrógenos del metano son desplazados por halógenos como el yodo, el flúor y, sobre todo, el bromo y el cloro. Los THM están regulados y, además, son los marcadores más habituales para calcular los niveles de DBP presentes en el agua.

Los THM que se encuentran en el agua de consumo humano en mayor grado son el cloroformo, el bromodiclorometano (BDCM), el dibromoclorometano (DBCM) y el bromoformo. El cloroformo es el THM más abundante y acostumbra a ser el principal subproducto de la desinfección que se encuentra en el agua clorada. La formación de estos productos se ve influenciada por distintas variables: el pH, temperatura, tipo de materia orgánica, dosis del desinfectante y el tiempo de reacción ([Hernández et al., 2011](#)).

El interés acerca de la toxicidad de estos compuestos radica en el hecho de que muchos estudios clasifican a los THM como sustancias carcinógenas, asociadas con el desarrollo de varios tipos de cánceres y efectos adversos en el sistema reproductivo. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha clasificado al cloroformo y al bromodiclorometano en el grupo 2B que incluye a las sustancias posiblemente carcinogénicas en humanos ( [IARC, 2003](#) ).

Diversas investigaciones realizadas en los últimos años han demostrado que los subproductos de desinfección yodados (I-DBP) presentan una toxicidad mucho mayor que los THM tradicionales bromados y clorados ( [Dong et al., 2018](#) ). Además de presentar una toxicidad elevada, estos I-THM también pueden afectar de manera significativa a las características del agua como su sabor u olor, motivo que implica un mayor preocupación por el control de los THM ( [Richardson et al., 2007](#) ).

Considerando esta toxicidad asociada con los THM y debido a que el agua de consumo humano constituye una de las vías principales de exposición a estos compuestos, su presencia en las aguas de consumo humano está limitada en Europa por la Directiva Europea

98/83/CE que establece como valor máximo 100 µg/L en la suma de los 4 THM regulados y en Estados Unidos por la USEPA ( Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) que ha implantado como valor máximo 80 µg/L.

En las industrias alimentarias, por otra parte, también existe problemática relacionada con la presencia de trihalometanos. Los THM aparecen en los alimentos debido al contacto con el agua utilizada en el proceso de limpieza y desinfección de los alimentos ( [Simoes et al., 2020](#) ). Este problema suele aparecer en los productos de cuarta gama, productos frescos procesados mínimamente como vegetales y frutas, ya que el cloro ha sido ampliamente adoptado en los procedimientos de desinfección y lavado de estos productos frescos cortados debido a su bajo costo y eficacia contra un amplio espectro de microorganismos.

Existen diversas estrategias alternativas ecológicas e innovadoras de tratamientos de desinfección para este tipo de productos alimenticios tanto biológicos como físicos y químicos que pueden lograr una reducción de microorganismos similar a la del cloro sin producción de compuestos tóxicos o comprometer la calidad de los productos frescos cortados ( [Meireles et al., 2016](#); [Rico et al., 2007](#); [Gómez-López, 2013](#) ).

Los niveles finales de SPD en el agua de consumo humano pueden verse minimizados por distintos tratamientos como: reacciones de oxidación, procesos de coagulación-floculación-sedimentación y filtración, paso a través de membranas o por adsorción sobre carbón activado ( [Hernández et al., 2011](#); [Chowdhury et al., 2019](#) ). Existen otros métodos efectivos para controlar los SPD que es mediante el uso de desinfectantes alternativos como el ozono, cloraminas, dióxido de cloro y, lo más reciente, es el empleo de radiación ultravioleta o la mezcla de oxidantes generados electroquímicamente.

## **2. Objetivo**

Analizar la problemática relacionada con la presencia de THM en el agua de consumo humano e industrias alimentarias en torno a sus repercusiones en la salud y analizar y comparar los distintos tratamientos de desinfección existentes para evitar o reducir su formación.

## **3. Materiales y métodos:**

La herramienta utilizada para la búsqueda de los distintos artículos ha sido el Polibuscador y se ha realizado una revisión sistemática de artículos científicos consultando las bases de datos: Riunet, PubMed, Dialnet, entre otras, con restricción de fecha de los últimos 10 años, en los idiomas español e inglés principalmente. No se hicieron restricciones respecto al tipo de estudio. Se revisaron los resúmenes y en los casos necesarios los artículos completos, teniendo en cuenta finalmente todos los artículos que incluían información relevante sobre el tema en cuestión, subproductos de desinfección en el agua de consumo humano y la toxicidad asociada a estos SPD. Para la búsqueda de los distintos artículos de interés se introdujeron las palabras claves: trihalometanos, toxicidad asociada a los SPD, subproductos de desinfección, desinfección de agua potable, desinfección productos IV gama.

#### 4. Fuentes de exposición

La exposición a THM se da a través de distintas vías de exposición, incluida la exposición oral, cutánea y respiratoria. Tras la absorción, estos elementos tienden a acumularse en el tejido adiposo, el hígado, los riñones y los pulmones dependiendo de la concentración y de la vía de exposición (OMS, 2000; Nieuwenhuijsen et al., 2000). La inhalación ha demostrado ser una de las vías más importantes de exposición a los THM, ya que estos subproductos son volátiles y pueden acumularse en el aire interior durante actividades como natación, ducha y otras actividades relacionadas con el agua ( Backer et al., 2000; Lynberg et al., 2001).

En primer lugar, cabe destacar que el consumo de agua potable es la principal vía de exposición por ingestión. Actividades como lavarse las manos, lavar los platos o la ducha son las actividades diarias que provocan la exposición por contacto dérmico. En el caso de la exposición por inhalación, actividades como la ducha o natación son las que conllevan en mayor medida esta exposición a THM ( Nazir y Khan, 2006).

Las concentraciones de THM en espacios como piscinas cubiertas, jacuzzis y baños son generalmente más altas debido a que las presiones de vapor elevadas ( Harman et al., 2017), lo que supone una mayor concentración de THM en el aire debido a una mayor evaporación de estos compuestos volátiles.

Se ha demostrado que las concentraciones de THM en el agua y en el aire aumentan al aumentar la temperatura del agua. El efecto de la temperatura está relacionado con dos mecanismos: en primer lugar, la mayor producción de THM y en segundo lugar, el reparto aire-agua descrito por la constante de la Ley de Henry ( Chowdhury y Champagne, 2009 ).

La mayor producción de THM con el aumento de la temperatura se debe a que se produce un aumento de las velocidades de reacción entre el cloro residual y la materia orgánica por el aumento de la temperatura ( Chowdhury y Champagne, 2009 ). Por otra parte, las concentraciones de THM aumentan con la temperatura debido a la dependencia de la temperatura de la reacción de halogenación, motivo por el cual se explica este aumento en el transporte de THM del agua al aire. ( Hua y Reckhow, 2008). Además, la constante de la ley de Henry depende de la temperatura.

Diversos estudios en la literatura han afirmado que las vías de exposición respiratoria y dérmica, constituyen dos fuentes de exposición a los THM muy importantes además de la exposición por vía oral ( Siddique et al., 2015; Lee et al., 2004 ).

La exposición por inhalación es relativamente alta debido a la volatilidad de los THM, tanto que puede haber demostrado exceder las exposiciones tanto por ingestión como por vía dérmica ( Lin y Hoang, 2000; Thiriat et al., 2009; Basu et al., 2011).

En vista de los resultados indicados por distintos estudios ( Mesut et al., 2019 ), será importante tomar medidas para intentar minimizar la exposición a estos compuestos volátiles, aumentando la ventilación en áreas cubiertas como piscinas, jacuzzis, duchas o considerando otros métodos para la desinfección del agua.

Por los resultados observados y las conclusiones extraídas de los diversos estudios analizados, se puede destacar que la estimación de la exposición de múltiples rutas a los THM es muy importante, ya que los límites para los valores de THM presentes en el agua se definen considerando la ingestión, y no incluyen la exposición por otras vías. Por lo que es importante considerar el efecto acumulativo de las tres vías de exposición.

## 5. Toxicidad: Efectos sobre la salud

En la década de 1970, se observaron por primera vez la presencia de subproductos formados por la reacción del cloro con otros compuestos presentes en el agua y se comenzaron a investigar entonces los posibles efectos sobre la salud de los SPD ( [Bellar et al., 1974](#); [Hrudey, 2009](#)).

Los estudios realizados en ratones de la época mostraron la aparición de efectos tóxicos a nivel renal y hepático principalmente ( [Klaassen y Plaa, 1966](#)). El Instituto Nacional de Cáncer reveló los efectos cancerígenos del cloroformo en el año 1976 por los resultados obtenidos en numerosas investigaciones realizadas. Destacándose este tema como un posible problema de salud humana, las investigaciones sobre estos SPD y sus efectos tóxicos no han cesado hasta la fecha.

Durante los años la investigación sobre los THM y sus efectos tóxicos ha demostrado que los subproductos de la cloración provocan mutaciones en el ADN bacteriano ( [Kargalioglu et al. 2002](#) ). Este efecto ha sido analizado también en células de mamíferos y se ha informado de los mismos resultados toxicológicos señalando su carcinogenicidad y mutagenicidad en distintos sistemas biológicos destacando los posibles riesgos sobre la salud humana ( [IARC, 2003](#); [Lu et al. 2002](#) ; [Plewa et al. 2002](#) ; [Zani et al. 2005](#) ).

Tras todos los estudios realizados sobre la materia hasta la fecha, la exposición crónica a THM se ha asociado de manera clara con el cáncer de vejiga, ( [Cantor et al. 1998](#); [Richardson et al. 2007](#); [Nieuwenhuijsen et al. 2009 a](#); [Villanueva et al. 2015](#)) aunque la evidencia de una asociación con otros cánceres ha sido inconsistente.( [Nieuwenhuijsen et al. 2009](#); [Rahman et al., 2010](#); [Rahman et al. 2014](#); [Beane et al. 2017](#)). Otros estudios han evidenciado el vínculo existente entre la exposición a los THM y resultados adversos del nacimiento como defectos congénitos y anomalías en el desarrollo fetal durante el embarazo, como nacimiento prematuro o pequeño para edad gestacional (PEG) ( [Kramer et al. 1992](#); [Bove et al. 1995](#); [Gallagher et al. 1998](#); [Nieuwenhuijsen et al. 2009 a](#) ; [Grellier et al. 2010](#) ). Existen inconsistencias en la evidencia epidemiológica general de los efectos en el desarrollo, sin embargo, la asociación entre los THM y el nacimiento PEG ha resultado ser la más consistente ( [Nieuwenhuijsen et al. 2009 b](#); ; [Grellier et al. 2010](#)). Aumentos en los marcadores de daño hepático han sido asociados también con la exposición a THM ( [Burch et al. 2015](#)).

Actualmente, estos resultados informados por distintos estudios acerca de la relación de exposición a los THM e implicaciones negativas en el desarrollo fetal se han analizado para comprobar las conclusiones obtenidas en estudios anteriores. Siguiendo este objetivo, se ha realizado un metanálisis de estudios epidemiológicos sobre la exposición materna a trihalometanos (THM) y ácidos haloacéticos (HAA) y el riesgo de nacimiento de pequeños para la edad gestacional (PEG) ( [Summerhayes et al., 2021](#)). Los resultados sugieren un mayor riesgo de PEG después de la exposición a muchos de los DBP regulados, reafirmando las conclusiones extraídas en los estudios realizados anteriormente.

Con el fin de analizar los efectos tóxicos y mecanismos de acción de los distintos THM, se han realizado estudios sobre los diferentes tipos de THM en particular.

Los estudios realizados sobre THM bromados han sugerido que este tipo de THM son altamente tóxicos por ser mucho más cancerígenos y mutagénicos que sus análogos clorados ( [Plewa y Wagner, 2004](#); [Richardson et al. 2007](#); [Regli et al. 2015](#) ) de modo que un cambio a especies más altamente bromadas puede aumentar el riesgo de cáncer por exposición crónica a través del agua potable.



Los estudios con BDCM en animales han demostrado que BDCM aumenta la formación de tumores hepáticos, renales e intestinales ( [USEPA, 2018](#)). En el caso de DBCM hay evidencia limitada de su carcinogenicidad, pero presentó relación con aparición de adenomas y carcinomas hepatocelulares sobre todo en ratones hembra ( [USEPA, 2018](#) ).

En relación al cloroformo, se ha demostrado que presenta un mecanismo de acción diferente en comparación con los THM bromados, siendo el cloroformo **citotóxico** mientras que los THM bromados (bromodichlorometano, bromoformo y dibromoclorometano) resultaron ser **citotóxicos, genotóxicos y mutagénicos** ( [Castro et al., 2019](#)). Destacándose la relevancia de la exposición crónica a THM como un problema de salud humana.

Entre los diferentes THM, se ha informado que el cloroformo es el principal THM que causa riesgo de cáncer a través de la vía de exposición tanto oral como dérmica, mientras que en el caso de la inhalación se debe principalmente a BDCM ( [USEPA, 2018](#)). Un análisis de sensibilidad de los THM reveló que el cloroformo es el parámetro predominante seguido del peso corporal y la duración de la exposición que influyen en el riesgo de cáncer ( [Minashree et. al, 2015](#)).

Los THM se han estudiado ampliamente por separado ,principalmente los 4 THM marcadores y se han analizado los resultados obtenidos en relación al riesgo que suponen para la salud, aunque ha sido demostrado de manera clara sus efectos tóxicos (citotóxicos, mutagénicos y genotóxicos) por numeroso estudios, es posible que no se hayan reproducido unas condiciones reales y las concentraciones no sean las adecuadas, además se ha especulado sobre un efecto sinérgico y aditivo de los THM por lo que sería interesante la realización de estudios con unas condiciones óptimas para comprobar la toxicidad en un escenario real con la utilización de mezclas de THM para analizar los resultados toxicológicos.

## 6. Problemática en la Industria Alimentaria

La producción de alimentos frescos es un área puntera en la industria alimentaria debido a los estilos de vida modernos y la demanda de los consumidores de alimentos frescos, saludables y listos para consumir. Esta sección cubre aquellos productos vegetales, limpios cortados y envasados, formados por verduras y hortalizas mezcladas, que para mantener sus cualidades organolépticas, sanitarias y multifunciones son conservados a una temperatura de 1-4°C desde su recolección hasta el consumo y envasados en atmósfera modificada ( [Simoes et al., 2020](#)). Entre los métodos de desinfección aplicados para la limpieza de estos productos, se sabe que el cloro es eficaz contra una gran variedad de microorganismos y es usado ampliamente para la desinfección de verduras recién cortadas por su bajo costo ( [Ali et al., 2018](#) ). Sin embargo, este proceso químico debe realizarse con precaución ya que, como efecto secundario los SPD que aparecen en el agua de lavado consumen parte del desinfectante y reducen la cantidad de cloro para inactivar los patógenos. Por esta razón, se utiliza una dosis excesiva de cloro para compensar la pérdida ( [Lee et al., 2018](#)). Las altas concentraciones de cloro utilizadas aumentan las concentraciones de SPD tóxicos como los THM, la cloramina y HAA por reaccionar con la materia orgánica ( [Komaki et al., 2018](#); [Shen et al., 2016](#)). Esta reacción puede darse entre el cloro y el tejido vegetal, y entre el cloro y el

agua de lavado, que contiene sustancias y materia orgánica liberada por los vegetales, como escombros y exudados. Además, la matriz vegetal puede adsorber los THM presentes en el agua de lavado ( [Huang y Batterman, 2010](#)). Este hecho puede considerarse una amenaza para la salud humana ya que estos subproductos son cancerígenos ( [Lee et al., 2018](#)), motivo por el cual durante los últimos años se ha considerado el uso de métodos alternativos para reemplazar y / o reducir el uso de cloro, persiguiendo minimizar la formación de SPD durante la desinfección de los productos de IV gama en la industria alimentaria ( [Hung et al., 2017](#); [Meireles et al., 2016](#)) .

La producción potencial de THM se ha convertido en una de las principales preocupaciones de los investigadores, la industria y las agencias reguladoras en relación al proceso de limpieza de los productos vegetales frescos mediante desinfectantes clorados. Sin embargo, solo se dispone de información limitada con respecto a los peligros reales involucrados por la formación de THM en el agua de lavado del proceso y su incorporación en el producto final.

Los SPD que pueden aparecer en este tipo de alimentos han suscitado una mayor preocupación para la exposición del consumidor, debido a que estos subproductos se unen a sustancias bioactivas de la dieta y pueden liberarse durante la digestión ( [Komaki et al., 2018](#)). Son varios los países que han establecido límites para 4 THM y 6 HAA en el agua potable, pero no se han establecido regulaciones para los THM en los alimentos. Por este motivo, varios estudios se han centrado en analizar si el uso de agentes clorados en el agua de lavado en el proceso de limpieza y desinfección de los vegetales frescos en la industria alimentaria puede suponer una preocupación real en relación a si la exposición a los THM mediante estos alimentos supone un riesgo para la salud de los consumidores.

Teniendo en cuenta que la hipercloración es utilizada comúnmente en la industria alimentaria del corte fresco para asegurar la inocuidad del alimento, se podría esperar unos niveles altos de THM en el agua de lavado de proceso de la industria.

Se han realizado diversos estudios en distintos tipos de verduras para analizar los niveles de THM en el alimento tras el proceso de enjuagado en la industria alimentaria. Un estudio realizado en mezclas de ensaladas se centró en valorar los niveles de THM a los que se pueden exponer los consumidores a través del consumo de productos de IV gama, en este caso, en mezclas para ensaladas, y el riesgo potencial para la salud de la población ( [Simoes et al., 2020](#)). Los resultados han sugerido que el proceso de desinfección industrial halogenado realizado en las muestras analizadas teniendo en cuenta sus patrones de consumo no representa un riesgo para la salud de los consumidores, ya que los valores de THM presentes en el alimento después del enjuagado eran insignificantes.

[Cardador y Gallego](#) (2016, 2017) sugirieron que en las verduras ligeramente procesadas pueden no detectarse los THM si se evaporan antes de llegar al consumidor. Sin embargo, estos autores reportaron la presencia de este grupo de compuestos en alimentos enlatados y vegetales congelados, rechazando la hipótesis anterior. Los resultados indicaron de nuevo, que las concentraciones de THM en el producto final carecían de importancia por sus niveles reducidos y no se consideran un riesgo para la salud de los consumidores.

Por otro lado, [Huang y Battermann](#) ( 2010 ) años atrás estudiaron el comportamiento de sorción de los distintos THM en los alimentos durante los procesos de lavado y cocción,

incluyendo a los vegetales frescos. Concluyeron que los niveles de THM entre los vegetales estudiados mostraron grandes fluctuaciones, llegando en algún caso a ser destacable, señalando, en este caso, a estos productos de IV gama como posible fuente de exposición.

Otro estudio realizado en espinacas baby ( [López-Gómez et al., 2013](#) ), se centró en evaluar la formación de THM en el agua de lavado del proceso después de lavar espinacas tiernas con distintos desinfectantes a base de cloro y comprobar su incorporación en el producto final. Además, analizaron la influencia que tenía el uso de los distintos desinfectantes en la calidad organoléptica del alimento. Los resultados de este estudio experimental indicaron que, bajo las condiciones de uso del método experimental, proporcional a las condiciones utilizadas en las IIAA, los desinfectantes a base de cloro no supusieron ningún riesgo en relación a la incorporación de niveles importantes de THM en los alimentos que puedan suponer un riesgo para la salud del consumidor. Las concentraciones de THM después del proceso de lavado fueron muy bajas, y tras el proceso de enjuagado final prácticamente no se detectaron THM, es decir, los niveles en el producto final fueron despreciables. Se ha sugerido que es probable que los THM se puedan adsorber débilmente en la superficie de las hojas de la espinaca, en consecuencia, durante el proceso de enjuagando, son eliminados en su mayoría. Anteriormente se habían extraído conclusiones similares en productos frescos como zanahorias ( [Klaiber et al., 2005](#) ).

Desde el punto de vista de la calidad organoléptica del producto, se realizaron ensayos con desinfectantes clorados y no clorados, como el ácido peracético o el agua electrolizada ( [Gómez- López et al., 2013](#) ). Los resultados mostraron que ni la calidad ni la vida útil del producto se vieron afectadas en ninguno de los dos casos. Tras la limpieza y durante el almacenamiento del producto en envases de atmósfera modificada, se observaron medidas similares de concentración de gas en el espacio de cabeza, cualidades microbianas y sensoriales, textura del instrumento, color y fuga de electrolitos para todas las espinacas tratadas con los distintos desinfectantes. Por lo que los resultados proporcionaron evidencia de que bajo estas condiciones experimentales específicas, los desinfectantes a base de cloro no causaron riesgo de presencia de THM en el producto final ni influyeron en la calidad de este.

Tras analizar los resultados de los distintos estudios realizados en estos productos de IV gama, queda evidenciado que el método de desinfección actual de la industria alimentaria del corte fresco con desinfectantes clorados no supone un riesgo para la salud de los consumidores, ya que los niveles de THM tóxicos en el producto final son insignificantes como para poder señalar a los alimentos como una fuente de exposición importante. Son varios los estudios que han mostrado que el uso de fuentes alternativas al cloro como agentes desinfectantes no han supuesto una mejora en la calidad organoléptica del producto final. Sin embargo cabe destacar que el desarrollo y perfeccionamiento de tratamientos alternativos para la desinfección de los alimentos son necesarios para reducir o evitar la formación de estos SPD tóxicos ( [López-Gálvez et al., 2018](#) ). Según distintos autores, es posible lograr una eficacia similar a la del cloro sin la generación de estos SPD indeseables o sin comprometer la calidad de las verduras listas para el consumo utilizando otros métodos alternativos, sólo o combinados, para la desinfección de los vegetales frescos ( [Feliziani et al., 2016](#) ). En los últimos años se han descrito distintos tratamientos y estrategias alternativas para mitigar el problema de la aparición de SPD como por ejemplo el uso de ozono, agua electrolizada,

filtración de membranas, radiación UV... Es conveniente seguir estudiando estos métodos alternativos y su puesta en marcha en la industria alimentaria para evitar la incorporación de ningún tipo de THM en el producto final.

Otra posible problemática en relación a los THM que aparece en la industria alimentaria son los vertidos de aguas residuales de la industria alimentaria ya que antes de su vertido en la red pública se realiza una cloración para asegurar la eliminación de todos los patógenos que se puedan haber formado en los distintos procesos de limpieza en la industria. Este proceso podría conllevar a la formación de THM, ya que en estas aguas existen restos orgánicos con los que el cloro reacciona. Este proceso podría suponer un riesgo medioambiental por la incorporación de mayores niveles de estos SPD en las aguas.

## 7. Determinación analítica

Debido a las bajas concentraciones en las que se encuentran los THM tanto en las aguas naturales como en las aguas de consumo humano, del orden de ng/L a µg/L, son necesarios procedimientos analíticos muy sensibles para su extracción y determinación.

Además de las técnicas utilizadas para el pretratamiento y concentración de la muestra, los THM se separan y determinan mediante **cromatografía de gases (GC)**, ya que se tratan de compuestos volátiles. Para su separación en el cromatógrafo de gases se utiliza una columna capilar de polaridad media, seguida de detectores: detector de captura de electrones (ECD), detector de microcaptura de electrones ( $\mu$ - ECD), detector de masas (MSD) o espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) (Rosero et al., 2012; Bahri y Driss, 2010).

Sin embargo, los detectores ECD o  $\mu$ ECD se consideran los detectores más adecuados para identificar y cuantificar los THM, debido a que todos los THM contienen uno o más elementos halogenados en su estructura química. Dado que estos detectores presentan una mayor selectividad y sensibilidad a estos compuestos halogenados, se consideran los más adecuados para la determinación analítica de los THM (Vallejo et al., 2016).

Hoy en día, la concentración de THM en el agua de consumo humano es determinada por **GC acoplado a un ECD** usando el método de la EPA 551 (Agencia de Protección Ambiental Norteamericana) (Anexo 1) (Pérez et al., 2008).

La preparación de la muestra es considerada uno de los pasos más críticos del análisis y requiere trabajar con cuidado. En este paso, los componentes diana se separan del sustrato y son preconcentrados previamente para mejorar la selectividad, sensibilidad, fiabilidad, precisión y reproducibilidad del ensayo (Hernández et al., 2011).

Las técnicas más utilizadas para la extracción de THM en matrices acuosas son las siguientes:

#### a) **Inyección acuosa directa (DAI):**

Esta técnica es una de las más empleadas debido a su facilidad. La muestra de agua es inyectada directamente en el cromatógrafo de gases y no requiere preconcentración, por lo que hay menor pérdida de muestra, ya que se evita la pérdida por volatilidad y existe una menor contaminación por manipulación.

El principal inconveniente que puede presentar este método de inyección, es el deterioro de la columna por el uso de productos orgánicos volátiles y sales inorgánicas. Muchos estudios han utilizado el método DAI-GC-ECD para la determinación de THM en agua con éxito ([Aeppli et al., 2008](#)).

Los límites de detección obtenidos utilizando este método se sitúan en torno a 0,01 (g/L) ([Pérez et al., 2008](#)).

#### b) **Extracción líquido-líquido (LLE):**

Esta técnica consiste en la extracción de los THM mediante un disolvente. La técnica ha mejorado con los años, disminuyendo el volumen de disolvente necesario para la extracción a pocos mL ( 0,5-2 mL) ([Hernández et al., 2011](#)). Varios estudios han comparado distintas técnicas de extracción para estos componentes como la LLE-GC-ECD, LLE-GC-MS y espacio en cabeza (HS-GS-ECD) ( [Nikolaou et al., 2002](#)), y han demostrado que la técnica LLE-GC-ECD es la más sensible para la determinación de THM.

#### c) **Técnica de espacio en cabeza (Headspace, HS):**

Esta técnica se basa en la extracción de analitos de la muestra utilizando una fibra capilar de sílice fundida recubierta con un adsorbente, generalmente un polímero, seguido de una desorción térmica de los analitos ([Bahri y Driss, 2010](#); [Rosero et al., 2012](#) ).

Esta técnica ofrece varias ventajas: la extracción de la muestra y preconcentración es rápida, simple y proporciona una alta sensibilidad. Además es libre de disolventes orgánicos y no tiene un elevado costo ( [Vallejo et al., 2016](#) ). La principal ventaja que presenta esta técnica realmente, es permitir la volatilización de la muestra. La manipulación de la muestra es mínima por lo que se disminuyen los errores.

Los límites de detección en muestras de aguas se encuentran comprendidos entre 0,0004-1,2 g/L, dependiendo del detector que se le acople al cromatógrafo de gases ( [Pérez et al., 2008](#) ).

d) **Técnica de muestreo de membrana:** Se trata de una microextracción utilizando una fase líquida (HF-LPME), donde para llevarla a cabo se utiliza una membrana de fibra hueca (HF). Presenta varias ventajas como la posibilidad de ser automatizada, no es necesario el uso de disolventes y la introducción de los analitos puede darse directamente a través de la membrana ([Geme et al., 2005](#)).

Los límites de detección obtenidos utilizando este método analítico oscilan entre 0,00043 y 2,8 g/L ( [Pérez et al., 2008](#)).

## 8. Tratamientos alternativos para reducir o evitar su presencia

Tras años después del descubrimiento de la aparición de los SPD formados en el proceso de cloración y los efectos tóxicos tanto cancerígenos como mutagénicos que han sido demostrados por múltiples estudios, encontrar métodos de desinfección alternativos eficaces es un desafío tanto para los científicos como para la industria alimentaria en la actualidad. Se han realizado numerosas investigaciones acerca de las distintas estrategias para reducir los niveles de THM o prevenir su formación, tanto en el agua para consumo humano como en el agua de limpieza utilizada en la desinfección de los productos vegetales frescos mínimamente procesados en la industria alimentaria.

Es importante destacar que el objetivo de minimizar la generación de SPD no debe afectar en ningún caso el objetivo principal de la desinfección del agua, que es la eliminación total de los microorganismos patógenos. Es necesario que el agua tratada sea siempre potable desde el punto de vista microbiológico.

Existen diversas alternativas para reducir la concentración de THM que se producen en el proceso de desinfección del agua de consumo humano sin afectar a su calidad microbiológica. Para conseguirlo pueden seguirse varias estrategias: reducir los precursores de THM (control a través de un tratamiento) y mejorar las estrategias de desinfección (optimización de desinfectantes alternativos) ( [Rodríguez et al., 2007](#) ).

En primer lugar, para disminuir estos niveles de THM en el agua, existen técnicas tradicionales que ayudan a conseguir este efecto además de disminuir la carga microbiana presente. Se ha demostrado mediante distintos estudios que el almacenamiento del agua puede llevar a una disminución de la cantidad de THM, debido a su volatilización y cómo la reducción de estos valores se da en mayor medida en recipientes descubiertos ( [Chowdhury et al., 2019](#); [Pinto y Baltazar, 2020](#) ).

En el año 2019, [Chowdhury y colaboradores](#) aplicaron diferentes tratamientos al agua para evaluar sus efectos sobre los niveles de THM. Entre estos tratamientos se incluyeron la **ebullición del agua**, su almacenamiento y **filtrado mediante carbón activo**.

De estos procesos, la ebullición y la filtración presentaron unos valores de reducción elevada en los niveles de THM (77-93 % respecto al valor inicial), por lo que resultaron ser bastante eficientes ( [Chowdhury et al., 2019](#) ).

Por otro lado, varios estudios han vinculado el tipo de tubería utilizada para distribuir el agua con los niveles de THM. En 2017, [Zhang y colaboradores](#) evaluaron el impacto de varios materiales utilizados en tuberías, como polietileno, hierro fundido dúctil y acero inoxidable, sobre el crecimiento y los niveles de bacterias, siendo el acero inoxidable el material que mostraba menor crecimiento microbiano y en consecuencia menores cantidades de THM en el agua. Por lo tanto, cambiar el material de canalización podría ser también una estrategia para conseguir una reducción de los niveles de estos compuestos.

Analizando en primera instancia las estrategias estudiadas y utilizadas para reducir los niveles de THM en el **agua** destinada para el consumo humano se pueden destacar, aparte de las técnicas tradicionales descritas anteriormente (ebullición, almacenamiento y absorción



sobre carbón activado) existen distintos tratamientos que han demostrado ser útiles y se describen a continuación.(Tabla 1)

Tabla 1:Tratamientos alternativos de desinfección utilizados en agua de consumo humano para reducir la formación y/o los niveles de THM.

Tratamiento	Eficacia	Referencia bibliográfica
Ebullición	Alta eficacia en la reducción de THM. Reducción: 83%	<a href="#">Hernández et al., 2011</a>
Filtración sobre carbón activado	Alta eficacia en la reducción de THM. Reducción: (93-99%)	<a href="#">Hernández et al., 2011</a>
Filtración de membranas: Nanofiltración	Alta eficacia en la reducción de THM. Reducciones: (80-90%)	<a href="#">Uyak et al., 2008</a>
Luz ultravioleta	Eficacia en la inactivación de una gran variedad de patógenos. Debe utilizarse en combinación con el cloro. Reducción de los niveles de cloro necesarios.	<a href="#">Ritt et al., 2020</a>
Ozonización de microburbujas	Alta eficacia en la reducción de materia orgánica y contaminantes.  Reducción de los niveles de cloro necesarios.	<a href="#">Qadafi et al., 2021</a> ; <a href="#">Gao et al., 2020</a> ; <a href="#">Hua y Reckhow, 2013</a> ; <a href="#">Chen et al., 2018</a> ; <a href="#">Aderonke et al., 2020</a> ; <a href="#">Qadafi et al., 2020a</a>

#### - Nanofiltración

La **nanofiltración** consiste en hacer pasar un fluido, en este caso agua, a través de una membrana semipermeable bajo una determinada presión, de forma que se produce una separación basada en el tamaño de las moléculas. Este proceso ha demostrado ser muy eficaz en la reducción de THM.

Han sido varios los estudios que han demostrado experimentalmente que los valores de THM se han visto reducidos de manera muy significativa mediante el uso de este tratamiento, alcanzando unas reducciones de 80-90% de los valores de THM iniciales ( [Uyak et al., 2008](#)).

## - Luz ultravioleta:

El método de desinfección por radiación ultravioleta (UV) ha sido estudiado ampliamente, debido a su eficacia en la inactivación de una gran variedad de patógenos, además de no producir SPD.

En el caso de la desinfección del **agua para consumo humano**, el proceso combinado de desinfección mediante cloro y radiación UV como desinfectantes químicos y físicos, es esencial para asegurar la seguridad del agua.

Ambos tratamientos han demostrado asegurar la eliminación del 100% de los microorganismos patógenos. La diferencia principal se encuentra en la formación de SPD tóxicos (HAA y THM), esto solo ocurre cuando se añade cloro. En el caso de la desinfección mediante la aplicación de luz UV no existe formación de SPD tóxicos y asegura de igual manera la desinfección total del agua ( [Ritt et al., 2020](#) ).

A pesar de que varios estudios han demostrado la eficiencia de la radiación UV como desinfectante de agua, así como su viabilidad y beneficios, existe una ordenanza, la **Ordenanza N° 2.914/2011**, que establece los procedimientos de control y vigilancia de la calidad del agua para el consumo humano y su norma de potabilidad. En ésta se indica que toda agua destinada al consumo humano, suministrada colectivamente, debe someterse a un proceso de desinfección o cloración y en el caso del uso de ozono o radiación ultravioleta como desinfectante, debe añadirse cloro o dióxido de cloro para mantener un residuo mínimo en el sistema de distribución.

Por este motivo, podemos decir que el tratamiento ayudará a conseguir una reducción en la formación de SPD tóxicos porque la cantidad de cloro necesaria para conseguir la total desinfección del agua será menor.

## - Ozonización de microburbujas:

Otro tratamiento de desinfección alternativo utilizado en el agua es la ozonización de microburbujas. Se han realizado distintas investigaciones para determinar el efecto de la ozonización de microburbujas como método de desinfección del agua ( [Qadafi et al., 2021](#); [Gao et al., 2020](#) ).

El ozono tiene la capacidad de degradar compuestos orgánicos de alto peso molecular ( ácido húmico) a tamaños más pequeños que suelen ser hidrófilos ( [Hua y Reckhow, 2013](#) ). Estudios realizados en los últimos años han informado que el proceso de ozonización podría llevar a una reducción en la formación de THM y HAA ( [Chen et al., 2018](#); [Gao et al., 2020](#) ).

La ozonización de microburbujas ha sido utilizada en gran medida para el tratamiento de agua y aguas residuales para reducir la materia orgánica presente y los contaminantes. La razón de la aplicación del ozono mediante microburbujas es que se optimiza la transferencia de masa de ozono debido al tamaño de las burbujas y de esta manera, se facilita la oxidación



de los contaminantes orgánicos presentes en el agua a tratar (Zeng et al., 2020). Varias investigaciones recientes se han centrado en analizar el efecto de la ozonización de microburbujas sobre la eliminación de materia orgánica disuelta en el agua (DOM) y su efecto sobre la formación de THM y HAA ( Qadafi et al., 2021; Gao et al., 2020). La **coagulación de alumbre** y la **adsorción sobre carbón activado** son dos estrategias que se han utilizado ampliamente para reducir la fracción de DOM. Como agente adsorbente se puede destacar también la semilla de *Moringa oleifera* que ha demostrado ser eficaz en la reducción de materia orgánica en el tratamiento de aguas ( Aderonke et al., 2020). Diversos estudios recientes han informado de que es necesaria la aplicación de otro tratamiento alternativo posteriormente para conseguir unos niveles de THM dentro de los estándares establecidos por la USEPA ( Qadafi et al., 2020a ).

Mediante el uso de la coagulación de alumbre y adsorción sobre carbón activado y la posterior aplicación de ozono en forma de microburbujas se consigue reducir la fracción de DOM y en consecuencia se consigue reducir los niveles de THM y HHA finales, por la menor cantidad de cloro añadido ( Qadafi et al., 2021).

Analizando estas conclusiones podemos decir que la aplicación combinada de estos tratamientos conducen a una reducción de los niveles de THM por la elevada reducción de contaminantes orgánicos que se consigue. Aunque el tratamiento ha demostrado ser exitoso en torno a la reducción de contaminantes, es necesaria la realización de un mayor número de investigaciones sobre la posible formación de otros SPD.

Si nos centramos en los métodos específicos para desinfectar las superficies en contacto con los alimentos y tratar el **agua para descontaminar el producto** que han sido detallados en la literatura podemos destacar varios métodos que han resultado exitosos ( Meireles et al., 2016 ). Estos métodos se pueden distinguir como: tratamientos biológicos (bacterias, bacteriófagos, enzimas y fitoquímica), tratamientos químicos (dióxido de cloro, agua oxidada electrolítica, peróxido de hidrógeno, ozono, ácidos orgánicos, etc.) y tratamientos físicos (irradiación, filtración, ultrasonidos, luz ultravioleta, etc.).

A continuación se describen algunos de los tratamientos alternativos que han resultado relevantes para llevar a cabo el proceso de desinfección de los **productos de cuarta gama** y el **agua de lavado** en la industria alimentaria. ( Tabla 2 )

Tabla 2: Tratamientos de desinfección alternativos al cloro utilizados en la industria alimentaria de los productos de cuarta gama.

Tratamientos	Modo de acción y uso	Referencias bibliográficas
Agua oxidante electrolizada	Mutaciones del ADN, disrupción de proteínas y enzimas celulares. Alta eficiencia de remoción de materia orgánica.	Cheng et al., 2012; Demirci y Bialka., 2010; Hricova et al., 2008; Abadias et al., 2008 ; Aday, 2016; Ayebah et al., 2006

	Uso: Desinfectar superficies en contacto con alimentos y descontaminar el producto.	
Ozono	Oxidante fuerte con alta capacidad bactericida. Uso: descontaminante para el producto y desinfectante para el agua de proceso y superficies en contacto con alimentos.	<a href="#">Horvitz y Cantalejo, 2014;</a> <a href="#">Chawla et al., 2012;</a> <a href="#">Foong-Cunningham et al., 2012;</a> <a href="#">Selma et al., 2008;</a> <a href="#">Vurma et al., 2009</a>
Ácidos orgánicos débiles	Reacción con la materia orgánica sin producción de SPD. Reducción de carga microbiana importante, son necesarias cantidades elevadas y puede presentar cambios en el sabor del producto.  Uso: desinfección de los alimentos	<a href="#">Lianou et al., 2012</a> ; <a href="#">Ölmez y Kretzschmar, 2009;</a> <a href="#">Sagong et al., 2011;</a> <a href="#">Vandekinderen et al., 2009;</a> <a href="#">Ge et al., 2013;</a> <a href="#">Park et al., 2011</a>
Radiación ionizante	Actúa sobre las moléculas de agua para formar radicales libres que matan o inhiben las bacterias. Reduce la carga microbiana para facilitar una mayor desinfección química.  No se suele utilizar en las IIAA	<a href="#">Ramos et al., 2013;</a> <a href="#">Doona et al., 2015;</a> <a href="#">Goodburn y Wallace, 2013</a>
Filtración de membranas	Retención de los contaminantes no deseados en una membrana según el tamaño molecular.  Uso: Tratamiento del agua de proceso y para evitar la contaminación cruzada del producto	<a href="#">Gil et al., 2009;</a> <a href="#">Cassano y Basile, 2013;</a> <a href="#">Singh, 2015;</a> <a href="#">Rodríguez et al., 2007;</a> <a href="#">Melo y Flemming, 2010</a>
Luz ultravioleta	Induce daños en el ADN microbiano, lo que conduce a la muerte celular. Alta eficiencia y tiempos de proceso reducidos.  Uso: desinfección de alimentos frescos	<a href="#">Paniwnyk, 2014;</a> <a href="#">Bermúdez-Aguirre et al., 2011;</a> <a href="#">São José et al., 2014;</a> <a href="#">Elizaquível et al., 2012</a>

Ultrasonidos	<p>Forma burbujas de cavitación que al colapsar generan puntos calientes que llevan a la formación de radicales libres en el agua que provocan modificaciones en el ADN de los microorganismos.</p> <p>Uso limitado en las IIAA debido a la necesidad de una intensidad elevada y altos tiempos de trabajo.</p>	<p>Gray, 2014; Bértmudez-Aguirre y Barbosa-Cánovas, 2013; Birmpa et al., 2013; Shama, 2014; Demirci y Krishnamurthy, 2010</p>
--------------	---	---

## Tratamientos químicos

### - Agua oxidante electrolizada

El agua oxidante electrolizada (EOW) es una tecnología relativamente nueva que se ha aplicado en la industria alimentaria. EOW está formada por la electrodiálisis de una solución de cloruro de sodio en una cámara de electrólisis con un ánodo y un cátodo separados por una membrana ( [Cheng et al., 2012](#); [Demirci y Bialka., 2010](#) ). Para producir este tipo de agua, se hace pasar una solución salina diluida y una corriente a través de la cámara disociando la solución en dos corrientes separadas: una ácida y otra alcalina ( [Hricova et al., 2008](#) ).

La solución ácida tiene poder antimicrobiano y tiene un modo de acción similar al del cloro (mutaciones del ADN, disrupción de proteínas y enzimas celulares). Además debido a la acidez, la membrana celular puede romperse y se facilita la acción del desinfectante( [Demirci y Bialka, 2010](#) ) . La solución alcalina funciona como detergente ( [Cheng et al., 2012](#) ). La EOW neutra puede formarse mediante la mezcla de estas dos soluciones ( [Cheng et al., 2012](#) ) o eliminando la membrana de separación en la celda de electrodiálisis. Este método puede ser ventajoso ya que la ausencia de la membrana evita la aparición de incrustaciones, mientras que la solución combinada tiene ventajas ( [Demirci y Balka, 2010](#) ).

La ventajas que pueden destacarse de la solución neutra de EOW es que es más estable y puede utilizarse para desinfectar superficies en contacto con alimentos y descontaminar el producto, ya que no influye en la apariencia del producto debido al pH neutro de la solución ( [Abadias et al., 2008](#) ).

Este método es respetuoso con el medio ambiente ya que solo utiliza sal y agua para producir la solución química, además cuando esta solución entra en contacto con materia orgánica se convierte en un producto seguro ( agua ) y puede desecharse de forma segura ( [Aday, 2016](#) ).

Por lo tanto, se puede concluir que la aplicación de EOW neutra es recomendable para reducir la concentración de cloro ( [Abadias et al., 2008](#) ), ya que la eficiencia de remoción de materia orgánica es mayor y consecuentemente al añadir menor cantidad de cloro, la

formación de SPD será menor también. Se requieren más estudios para caracterizar las especies químicas formadas durante la generación de EOW neutra, su actividad antimicrobiana, estabilidad e interacción con la materia orgánica. Existen evidencias que demuestran que en presencia de materia orgánica EOW genera menores cantidades de moléculas organocloradas que el hipoclorito de sodio ( [Ayebah et al., 2006](#)).

## - **Ozono**

El ozono (O<sub>3</sub>) se produce como un gas que puede disolverse en el agua. Se trata de un oxidante fuerte con una alta capacidad bactericida. Una ventaja que presenta el ozono es su nula residualidad, ya que se descompone de manera rápida en oxígeno y dióxido de carbono, por lo que no produce SPD tóxicos, además solo se necesitan pequeñas concentraciones para ejercer su acción antimicrobiana ([Horvitz y Cantalejo, 2014](#); [Foong-Cunningham et al., 2012](#)). Sin embargo, puede presentar algunos inconvenientes: se trata de un gas inestable y que tiene una rápida descomposición ( [Chawla et al., 2012](#) ), su uso es sensible a la presencia de materia orgánica y esto puede afectar a las propiedades fisicoquímicas del producto haciendo limitado su uso en la desinfección del alimento ( [Foong-Cunningham et al., 2012](#) ).

Se han realizado diversos estudios en productos frescos y en el agua de lavado de estos productos que han demostrado la alta eficacia del ozono como agente antibacteriano ([Selma et al., 2008](#); [Vurma et al., 2009](#) ).

Esta técnica de desinfección fue aprobada por la FDA para su uso en la industria alimentaria y ha sido utilizada como descontaminante para el producto y desinfectante para el agua de proceso ( [Foong- Cunningham et al., 2012](#) ) y superficies en contacto con alimentos.

La concentración de ozono necesaria para ser eficaz como agente antibacteriano es mucho menor que la de hipoclorito de sodio ([Foong- Cunningham et al., 2012](#)), por lo que puede considerarse ventajoso a la hora de utilizar este método como desinfectante ya que no se produce formación de SPD tóxicos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta la posibilidad de corrosión y la baja estabilidad que presenta.

## - **Ácidos orgánicos débiles**

Los ácidos orgánicos utilizados comúnmente en la industria alimentaria para la desinfección de los alimentos son el ácido cítrico, ácido acético, ácido láctico y el ácido peracético.

Los ácidos orgánicos presentan algunas ventajas frente a los desinfectantes clorados cuando son usados como desinfectantes en la industria alimentaria de corte fresco, ya que su interacción con la materia orgánica no produce compuestos tóxicos ( [Lianou et al., 2012](#) ).

Sin embargo, este método alternativo de desinfección puede presentar varias desventajas como la posibilidad de presentar cambios en el sabor del producto. Además, cuando estos ácidos orgánicos son utilizados para desinfectar los alimentos frescos, las aguas residuales resultantes del lavado de los alimentos pueden presentar valores elevados tanto de demanda química de oxígeno (DQO) como de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) ([Ölmez y](#)

[Kretzschmar, 2009](#) ). Otras desventajas señaladas son su alto costo y la corrosividad que puede provocar en el equipo ([Sagong et al., 2011](#)).

La investigación disponible muestra claramente que para tener efectos antimicrobianos significativos, estos ácidos orgánicos deben usarse en concentraciones mucho más altas que el hipoclorito de sodio, hecho que puede considerarse una desventaja.

Un estudio realizado en lechugas iceberg ( [Vandekinderen et al., 2009](#)) mostró que mediante la adición de ácidos orgánicos, en este caso, **ácido peracético**, redujeron la carga microbiana nativa en gran medida sin afectar en la calidad sensorial y nutricional del producto. Posteriormente, otros autores han realizado estudios similares sobre el mismo tipo de producto usando para el análisis, en esta ocasión, distintos ácidos orgánicos para ver su efecto relacionado con la descontaminación del producto y la reducción de los niveles de SPD. Los análisis realizados mostraron resultados similares a los obtenidos en estudios realizados anteriormente, con una reducción de carga microbiana importante, con la consiguiente reducción de la cantidad de cloro necesaria para su posterior desinfección. Estos autores han sugerido que los ácidos orgánicos son relevantes para la descontaminación de productos frescos. ( [Sagong et al., 2011](#); [Ge et al., 2013](#); [Park et al., 2011](#) ).

## **Métodos físicos**

### **- Radiación ionizante**

La radiación ionizante corresponde a las radiaciones de mayor energía (rayos gamma, rayos X) dentro del espectro electromagnético. Generan la energía suficiente como para arrancar electrones de los átomos con los que interaccionan, es decir, para producir ionizaciones. Todas estas formas de radiación ionizante funcionan de la misma manera. Actúan sobre las moléculas de agua para formar radicales libres que matan o inhiben las bacterias ( [Ramos et al., 2013](#)).

Este método físico está diseñado para ser utilizado en combinación con un método químico, ya que solo reduce la carga microbiana para facilitar una mayor desinfección química ([Doona et al., 2015](#)).

Las principales ventajas que presenta este método de desinfección son los bajos requerimientos energéticos y el reducido calentamiento de los alimentos ( [Ramos et al., 2013](#)). Este método no ha sido adoptado hasta el momento en la industria de productos frescos principalmente por la necesidad de una mayor investigación y porque el consumidor aún tiene una fuerte percepción negativa de los alimentos irradiados. Además, la calidad de los productos frescos puede verse afectada si se utilizan dosis altas ( [Ramos et al., 2013](#); [Goodburn y Wallace, 2013](#)).

### **- Filtración de membrana**

La separación por membranas se puede utilizar para el tratamiento del agua de proceso y para evitar la contaminación cruzada del producto en la industria alimentaria ( [Gil et al., 2009](#)). Este procedimiento consiste en hacer pasar un fluido ( agua) a través de una membrana semipermeable bajo una determinada presión y retener los contaminantes no deseados en la membrana, es decir, los contaminantes se separan basándose en el tamaño de las moléculas. La microfiltración (MF), la ultrafiltración (UF), la nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa (RO), son operaciones unitarias de membrana que se pueden aplicar en la industria alimentaria para tratar el agua de proceso ( [Cassano y Basile, 2013](#)).

Se diferencian por el tamaño de los poros de las membranas. En el caso de la UF es utilizada habitualmente para separar compuestos orgánicos de alto peso molecular , la NF es más utilizada en el tratamiento de aguas para su ablandamiento y eliminar sales orgánicas ( [Singh, 2015](#) ).

El uso de membranas filtrantes ha demostrado que permite retirar más del 90% de los precursores de los SPD y la mayoría de los patógenos eventualmente presentes en el agua bruta ( [Rodríguez et al., 2007](#)).

Si nos centramos en el uso de este método en la industria alimentaria no es usado ampliamente, esto es debido a los elevados costes que supone la implantación de la tecnología necesaria para su puesta en marcha. Además proporciona una vida útil limitada al producto final , debido a la alta caída de presión provocada por los biofilms formados y acumulados durante el proceso de filtración, por estas razones no resulta muy apta para la industria alimentaria ( [Melo y Flemming, 2010](#) ) .

## - **Ultrasonidos**

Los ultrasonidos son una serie de ondas mecánicas, generalmente longitudinales, cuya frecuencia está por encima de la capacidad de audición del oído humano ( [Paniwnyk, 2014](#)). Estas ondas forman burbujas de cavitación que cuando colapsan generan la energía necesaria para producir la acción desinfectante y la formación de radicales libres en el agua, con el consecuente aumento en la permeabilidad de las membranas celulares ( [Bermúdez-Aguirre et al., 2011](#)).

Cuando las burbujas colapsan se forman puntos calientes que llevan a la formación de los radicales libres que provocan modificaciones en el ADN de las células de los microorganismos ( [São José et al., 2014](#)).

Su uso en la industria alimentaria está limitado debido a que para la desactivación microbiana es necesario utilizar una intensidad elevada, esta intensidad puede afectar a las cualidades organolépticas del producto final.

Otra limitación de este método para su uso en la industria de los productos frescos es que su efectividad es óptima a una temperatura de unos 60°C , temperatura que afectaría a las propiedades sensoriales y organolépticas de estos productos.

La eficacia de los ultrasonidos en relación a su acción antimicrobiana es limitada, razón por la cual este tratamiento de desinfección suele utilizarse combinado con otros como la adición de cloro, aumentando su eficacia ( [São José et al., 2014](#)). Con la adición de cloro seguirán apareciendo SPD pero la aplicación de los ultrasonidos ayuda a reducir los niveles, ya que su acción antimicrobiana conlleva a una reducción en los niveles de cloro necesarios para finalizar el proceso de desinfección.



Este método físico ha sido ampliamente estudiado en la industria alimentaria para la descontaminación de productos y la desinfección del agua de lavado.

En relación a la desinfección del agua de lavado de los productos frescos, se han realizado estudios que han demostrado una reducción elevada de la carga microbiana existente mediante la aplicación de US, aunque se han necesitado tiempos de trabajo elevados, motivo por el cual no es considerado adecuado para su uso en la industria de los productos frescos ( [Elizaquível et al., 2012](#) ).

## - Luz ultravioleta

La luz ultravioleta (UV) es una radiación electromagnética con longitudes de onda que oscilan entre 100 y 400 nm. Se subdivide en cuatro grupos: UV-A, UV-B, UV-C y UV al vacío ( [Gray, 2014](#) ). Este método de desinfección físico ha demostrado ofrecer una gran eficacia en la inactivación de una gran variedad de patógenos, además de no producir SPD.

La luz UV-C (190–280 nm) es utilizada como agente antimicrobiano en la desinfección de **alimentos de IV gama**. El resultado de la aplicación de la luz UV es que induce daños en el ADN microbiano, lo que conduce a la muerte celular ( [Bérmudez- Aguirre y Barbosa-Cánovas, 2013](#); [Birmpa et al., 2013](#) ).

El ADN y el ARN celular absorben la energía alta asociada con la energía UV de longitud de onda corta, principalmente a 254 nm. Esta absorción de energía UV forma nuevos enlaces entre nucleótidos adyacentes creando dobles enlaces o dímeros, principalmente dímeros de timina. La formación de numerosos dímeros de timina en el ADN de bacterias y virus impide la replicación y la capacidad de infectar ( [Bérmudez- Aguirre y Barbosa-Cánovas, 2013](#) ).

Frente a otros métodos químicos de desinfección, la radiación UV proporciona una inactivación rápida y eficiente de los microorganismos mediante un proceso físico que no produce SPD tóxicos y es respetuoso con el medio ambiente.

Este método de desinfección puede presentar alguna desventaja, como la necesidad de la aplicación de una intensidad elevada, ya que a dosis más bajas los microorganismos pueden permanecer vivos, debido a sus mecanismos de reparación del ADN ( [Shama, 2014](#) ). Además, su uso prolongado puede alterar las propiedades organolépticas del alimento ( [Bérmudez- Aguirre y Barbosa-Cánovas, 2013](#) ).

La luz ultravioleta puede aplicarse de distintos modos: un modo continuo (lámparas UV) o luz ultravioleta pulsada ( [Gray, 2014](#) ).

Las ventajas que presentan las lámparas UV son su alta eficiencia (dependiendo de la dosis y el tiempo de exposición) y los tiempos de proceso reducidos ( [Birmpa et al., 2013](#) ). El modo de luz UV pulsada en comparación con las lámparas UV, ha demostrado ser más eficiente en la desinfección de alimentos frescos, debido a que la energía aplicada es mucho mayor ( [Demirci y Krishnamurthy, 2010](#) ). El principal inconveniente que se puede destacar es que el aumento de temperatura puede afectar negativamente en las características del producto final ( [Demirci y Krishnamurthy, 2010](#) ).

## - **Combinación de efectos**

Analizando las distintas estrategias descritas, se puede llegar a la conclusión de que la gran mayoría de los métodos biológicos, químicos y físicos que se describen tienen una eficacia limitada en el control del crecimiento microbiano cuando se aplican por separado. Por lo que se puede destacar que para conseguir una alta eficacia antimicrobiana la mejor solución es utilizar estos métodos de manera combinada.

Además, cuando se combinan con la adición de cloro, ayudarán a reducir la cantidad necesaria de cloro para lograr el efecto antimicrobiano, con la reducción de la formación de SPD tóxicos que se forman en el proceso de cloración. Diversas combinaciones de efectos tanto físicos como químicos y biológicos ya han sido descritas con éxito en la desinfección del agua de consumo humano, agua de lavado y productos de IV gama (Ritt et al., 2020; Selma et al., 2008; Sagong et al., 2012).

Con esta combinación se persigue aumentar la eficacia del proceso de desinfección reduciendo la producción de subproductos tóxicos.

Se debe destacar que si nos centramos en el **agua de lavado del producto**, son necesarias más investigaciones porque se debe asegurar una desinfección completa debido a que si esta agua se usa sin suficiente calidad microbiológica, puede causar contaminación cruzada lo que puede afectar la calidad y seguridad del producto.

## **9. Conclusión**

Los subproductos de desinfección producidos en el proceso de desinfección del agua mediante cloro siguen siendo una preocupación hoy en día. Esto se debe a la toxicidad demostrada que presentan estos SPD formados durante el proceso de desinfección del agua, los trihalometanos.

La exposición a los THM puede darse a través de distintas vías, mediante inhalación, exposición dérmica e ingestión. El consumo de agua es la principal vía de exposición a estos THM mediante la ingestión. La exposición por inhalación y por vía dérmica han mostrado contribuir en la exposición a los THM en gran medida, debido a que actividades diarias relacionadas con el agua como la ducha suponen una exposición elevada a estos compuestos. Además, cabe destacar que los THM se acumulan en el organismo causando efectos tóxicos por lo que se tiene que tener en cuenta la exposición acumulativa de las tres vías para calcular la exposición total y el posible sinergismo de los distintos THM.

Los estudios realizados durante los años para comprobar los efectos tóxicos de los THM han demostrado de manera clara que una exposición crónica a los THM supone un riesgo para la salud humana por sus efectos tóxicos: cancerígenos, mutagénicos y citotóxicos.

En relación a la problemática que representa la presencia de los THM en la industria alimentaria, se ha señalado a los productos de IV gama como posible fuente de exposición, aunque tras analizar los distintos estudios realizados sobre este tipo de alimentos se ha



podido concluir que los niveles de THM en el producto final son insignificantes, rechazando a estos productos como fuente de exposición.

Debido a los efectos tóxicos asociados a los THM, la búsqueda de estrategias alternativas para prevenir la formación o para conseguir una reducción en los niveles de estos SPD son esenciales, tanto en el tratamiento de aguas de consumo humano como en la industria alimentaria. Durante los años se han considerado numerosas estrategias físicas, químicas y biológicas para intentar dar solución a este problema. Diversos tratamientos alternativos han sido descritos con éxito y han demostrado ser eficaces en la reducción de los valores de THM. Cabe destacar que la gran mayoría de estos tratamientos ha demostrado ofrecer mejores resultados en combinación con otros métodos. Será necesario seguir con las investigaciones para analizar en profundidad las estrategias descritas hasta la fecha y los subproductos que pueden formarse mediante su aplicación, así como su optimización para conseguir una eliminación total de estos SPD tóxicos.

## 10. Referencias bibliográficas

ABADIAS, M.; USALL, J.; OLIVEIRA, M.; ALEGRE, I.; VIÑAS, I. (2008). Eficacia del agua electrolizada neutra para reducir la contaminación microbiana en vegetales mínimamente procesados. *Revista Internacional de Microbiología de Alimentos*, 123 ( 1-2 ) :151 - 158

ADERONKE ADETUTU OKOYA ;OLASUNKANMI OLALEKAN OLAIYA , ABIMBOLA BANKOLE AKINYELE,AND NNENNEH ORUADA OCHOR. (2020). Efficacy of Moringa oleifera Seed Husk as Adsorptive Agent for Trihalomethanes from a Water Treatment Plant in Southwestern, Nigeria. AE: JAMES BARKER. *Journal of Chemistry, Hindawi*

ADAY, MS. (2016).Aplicación de agua electrolizada para mejorar la calidad poscosecha del hongo. *LWT - Ciencia y tecnología de los alimentos* , 68: 44 - 51

AEPPLI C.; BERG M.; HOFSTETTER T.B.; KIPFER R.; SCHWARZENBACH R.P. (2008) Simultaneous quantification of polar and non-polar volatile organic compounds in water samples by direct aqueous injection-gas chromatography/mass spectrometry. *J. Chromatogr.* 1181 (1-2): 116-24

ALI, A.;YEOH, WK .; FORNEY, C.; SIDDIQUI M.W. (2018) .Avances en tecnologías de poscosecha para extender la vida útil de almacenamiento de frutas y verduras mínimamente procesadas.*Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* , 58 ( 15 ): 2632 - 2649

AYEBAH, B.; HUNG YC.; KIM, C; FRANK JF. (2006). Efficacy of electrolyzed water in the inactivation of planktonic and biofilm *Listeria monocytogenes* in the presence of organic matter. *J Food Prot.*, 69(9): 2143-2150.

BACKER L.; ASHLEY D.; BONIN M.; CARDINALI F.; KIESZAK S.; WOOTEN J (2000) Exposiciones de los hogares a subproductos de la desinfección del agua potable: niveles de trihalometano en sangre total. *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.*, 10: 321–326

BAHRI, M.; DRISS, MR. (2010). Development of solid-phase microextraction for the determination of trihalomethanes in drinking water from Bizerte, Tunisia. *Desalination.*, 250(1): 414–427.

BASU, M.;GUPTA, SK.; SINGH , G.; MUKHOPADHYAY, U. ( 2011 )  
Evaluación de riesgos de múltiples rutas de trihalometanos en suministros de agua potable  
*Environ. Monit. Assess.*, 178: 121-134

BEANE FREEMAN, L.E. ; CANTOR, K.P. ; BARIS, D.; NUCKOLS, J.R. ; JOHNSON, A.; COLT, J.S.; SCHWENN, M.; WARD, MH ; LUBIN, J.H. ; WADDELL, R.; HOSAIN, G.M. ; PAULU, C .; MCCOY, R .; MOORE, L.E.; HUANG, A.T.; ROTHMAN, N.; KARAGAS, M.R.; SILVERMAN, D.T. (2017). Bladder cancer and water disinfection by-products exposures through multiple routes: a population-based case-control study (New England, EE.UU.).*Environmental health perspectives*, 125(6)

BELLAR, TA.; LICHTENBERG, J.J.; KRONER, RC. (1974). The Occurrence of Organohalides in Chlorinated Drinking Waters. *J. AWWA*, 66: 703–706

---

BERMÚDEZ-AGUIRRE, D.; BARBOSA-CÁNOVAS, GV. (2013). Desinfección de vegetales seleccionados bajo tratamientos no térmicos: Cloro, ácido cítrico, luz ultravioleta y ozono *Control de alimentos* , 29 ( 1 ): 82 - 90

BOVE, F.J. ; FULCOMER, M.C. ; KLOTZ, J.B. ; ESMART, J. ; DUFFICY, E.M. ; SAVRIN, J.E. (1995). Contaminación del agua potable pública y resultados del nacimiento. *Soy. J. Epidemiol.* 141: 850 - 862

BURCH, JB ; EVERSON, TM ; SETH, RK ; WIRTH, MD ; CHATTERJEE, S. (2015) Exposición al trihalometano y biomonitorio para el indicador de daño hepático, alanina aminotransferasa, en la población de Estados Unidos (NHANES 1999-2006). *Sci.Total. Environ.*, 226 - 234 ,521–522.

---

CANTOR, K.P.; LYNCH, C.F. ; HILDESHEIM, M.E. ; DOSEMECI, M.; LUBIN, J.; ALAVANJA, M.; CRAUN, G. (1998). Fuente de agua potable y subproductos de la cloración y riesgo de cáncer de vejiga . *Epidemiología*, 9 : 21 - 28

CARDADOR, M.J.; GALLEGO, M. (2016). Static headspace-gas chromatography-mass spectrometry for the simultaneous determination of trihalomethanes and haloacetic acids in canned vegetables. *J. Chromatogr. A* , 1454: 9 - 14.

CARDADOR, M.J.; GALLEGO, M. (2017). Determination of several common disinfection by-products in frozen foods. *Food Addit Contam. Part A Chem. Anal. Control Expo. Risk Assess.*, 35(1): 56-65

CASSANO, A.; BASILE, A. (2013). Integrating different membrane operations and combining membranes with conventional separation techniques in industrial processes, en *Handbook of Membrane Reactors*, 2. Woodhead Publishing, Sawston, 296-343.

CASTRO MEDEIROS, L.; LACERDA SOUZA DE ALENCAR, F.; NAVONI, J.A.; CALADO DE ARAUJO, A.L. Y SOUZA DE AMARAL, V. (2019). Toxicological aspects of trihalomethanes: a systematic review. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 26: 5316-5332

CHAWLA, AS.; KASLER, D.R.; SASTRY, S.K.; YOUSEF, A.E. (2012).

Descontaminación microbiana de alimentos mediante ozono.

A. Demirci , MO Ngadi (Eds.) Descontaminación microbiana en la industria alimentaria , Woodhead Publishing ( 2012 ) , 495 - 532 pp.

CHEN, W.; ZHANG, Z.; LI, X.; WU, D.; XUE, Y.; LI, L. (2018). Reducción de la formación de DBP en la cloración de diclofenaco que contiene Br a través de la peroxidación Fe-Cu-MCM-41 / O<sub>3</sub>: eficiencia, caracterización Precursores y mecanismo de DBP. *J. Taiwan Inst. Chem. Ing.* , 84 : 212 - 221

CHENG, K.C.; DEV, S.R.S.; BIALKA, K.L.; DEMIRCI, A. (2012). Agua oxidante electrolizada para la descontaminación microbiana de alimentos, en *Descontaminación microbiana en la industria alimentaria*. Woodhead Publishing, Sawston, 563 – 591.

CHOWDHURY, S.;CHAMPAGNE, P. (2009).Riesgo de exposición a trihalometanos durante la ducha: evaluación y control probabilísticos. *Sci. Total Environ.*, 407 ( 5 ) :1570 - 1578.

CHOWDHURY S.; MAZUMDER M.A.J.; ALHOOSHANI K.; AL-SUWAIYAN M.S. (2019). Reduction of DBPs in synthetic water by indoor techniques and its implications on exposure and health risk. *Science of The Total Environment* , 691: 621-30.

DEMIRCI, A; BIALKA K.L. (2010). Electrolyzed oxidizing water, en *Nonthermal processing technologies for food*. Wiley- Blackwell. Hoboken, 366-376.

DEMIRCI, A; KRISHNAMURTHY, K. (2010). Pulsed ultraviolet light en *Nonthermal processing technologies for food*.Wiley- Blackwell. Hoboken, 249-261.

DONG, H.;QIANG, Z.; , LIU,S.; LI, J.; YU ,J.; QU, J. (2018). Oxidación de iopamidol con ferrato (Fe (VI)): cinética y formación de subproductos de desinfección yodados tóxicos. *Agua Res.* , 130: 200 - 207

DOONA C.J; FEEHERRY, F.E.; FENG, H.; GROVE, S.; KRISHNAMURTHY, K.; LEE, A.; KUSTIN K. (2015). Combinando desinfectantes y tecnologías de procesamiento no térmicas para mejorar la seguridad de los productos frescos cortados en, *Pasteurización haz y de procesamiento de alimentos complementaria tecnologías de electrones*. Woodhead Publishing, Sawston, 95 – 125.

FELIZIANI, E.L.; LICHTER, A. ; SMILANICK J.L.; IPPOLITO , A. (2016). Disinfecting agents for controlling fruit and vegetable diseases after harvest. *Postharvest Biology and Technology*, 122: 53 - 69

S. FOONG-CUNNINGHAM, S.; VERKAAR, E.L.C.; SWANSON, K. (2012). Microbial decontamination of fresh produce, en *Microbial Decontamination in the Food Industry*. Woodhead Publishing, Sawston, 3-29.

GALLAGHER, M.D. ; NUCKOLS, J.R. ; STALLONES, L .; SAVITZ, DA. (1998). Exposición a trihalometanos y resultados adversos del embarazo. *Epidemiología*, 9 : 484 - 489

GAO, H.;JI, V.; YU, R. ; ZHU , G. (2020). Effects of ozonation on disinfection by-product formation potentials and biostability in a pilot-scale drinking water treatment plant with micro-polluted water. *Environ. Technol.* ( 2020 ) , 1 - 12

GEME, G.; BROWN, M.A.; SIMONE, JR. P.; EMMERT, G.L. (2005). Measuring the concentrations of drinking water disinfection by-products using capillary membrane sampling.flow injection analysis. *Water Res.*, 39: 3827-3836.

GIL, M.I.; SELMA, M.V.; LÓPEZ-GÁLVEZ, F. ; ALLENDE, A. (2019). Saneamiento de productos recién cortados y desinfección del agua de lavado: problemas y soluciones. *Revista Internacional de Microbiología de los Alimentos* , 134 ( 1-2 ): 37 - 45

GÓMEZ-LÓPEZ, V.M.; MARÍN, A.;MEDINA-MARTÍNEZ, M.S.; GIL, M.I.; ALLENDE, A. (2013). Generation of trihalomethanes with chlorine-based sanitizers and impact on microbial, nutritional and sensory quality of baby spinach. *Postharvest Biology and Technology*, 85: 210-217

GOODBURN, C. ; WALLACE, C.A. (2013).The microbiological efficacy of decontamination methodologies for fresh produce: A review. *Food Control*, 32 ( 2 ) : 418 - 427

GRAY, N.F. (2014). Ultraviolet disinfection en *Microbiology of waterborne diseases* (2nd ed.), Academic Press, London , 617-630.

GRELLIER, J.; BENNETT, J.; PATELAROU,E.; SMITH,R.B.; TOLEDANO,M.B.; RUSHTON,L. *et al.* (2010). Exposure to disinfection by-products and adverse birth outcomes related to fetal growth and prematurity - a systematic review and meta-analysis *Epidemiology*, 21(3): 300-313

GRUAU G. (2004). Subproductos de cloro en agua destinada al consumo humano. Informe de estudio presentado a DRASS Bretagne y a la región de Bretagne. *Mutat. Res.*, 513: 151-157

HARMAN B.I.; TANACAN, E.; GENISOGLU , M.;KAPLAN-BEKAROGLU , S.S. ; ATES, , N.; YIĞIT, N.Ö.; SARDOHAN-KOSEOGLU,T.; KANAN , A.A.S. (2017). Yüzme havuzlarında karbon Bazlı dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumu. *DEU fiebre aftosa* , 19 ( 55 ) : 63 - 78

HERNÁNDEZ SÁNCHEZ, C.; LUIS GONZÁLEZ G., RUBIO ARMENDÁRIZ C.; CABALLERO MESA J.M.; BEN-CHARKI EL-MOUSATIN Y HARDISSON DE LA TORRE A. (2011). Trihalometanos en aguas de consumo humano. *Rev. Toxicol.*, 28 : 109-114.

HORVITZ, S.; CANTALEJO, M.J. (2014). Aplicación de ozono para el tratamiento poscosecha de frutas y hortalizas. *Revisiones críticas en ciencia de los alimentos y nutrición*, 54 ( 3 ): 312 - 339.

HRICOVA,D.; STEPHAN, R.; ZWEIFEL , C. (2008). Electrolyzed water and its application in the food industry. *Journal of Food Protection* , 71 ( 9 ): 1934 - 1947.

HRUDEY, S.E. (2009). Subproductos de desinfección de cloración y compensación de riesgo para la salud pública. *Agua Res.*, 43 (8): 2057-2092.

HUANG, A; BATTERMAN , S. (2010). Sorption of trihalomethanes in foods. *Environ. Int.*, 36: 754 - 762

HUA, G.; RECKHOW, D.A. (2008). Hydrophobicity and Molecular Size Distribution of Unknown TOX in Drinking Water. *J. Environ. Eng.*, 134 ( 3 ): 152 - 160

HUA, G.; RECKHOW, D.A. (2013). Efecto de la preozonización sobre la formación y especiación de SPD. *Agua Res.*, 47: 4322-4330

HUNG, Y.C.; WATERS , B.W.;YEMMIREDDY, V.K.; HUANG C.H. (2017). PH effect on the formation of THM and HAA disinfection byproducts and potential control strategies for food processing. *J. Integr. Agric.* , 16 ( 12 ): 2914 - 2923

IARC-Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (2003). Algunos desinfectantes y contaminantes del agua potable, incluido el arsénico. En: IARC Monographs on Evaluation of Carcinogenic Risks in Humans, vol 84.

KARGALIOGLU Y.; MCMILLAN B.J.; MINEAR R.A.;PLEWA M.J. (2002). Analysis of the cytotoxicity and mutagenicity of drinking water disinfection by-products in Salmonella typhimurium. *Teratog. Carcinog. Mutagen.*,22: 113–128.

KLAASSEN, C.D.; PLAA, G.L. (1996). Efectos relativos de varios hidrocarburos clorados sobre la función hepática y renal en ratones. *Toxicología y Farmacología Aplicada.*, 9 (1): 139-51.

KLAIBER, R.G.; BAUR, S.;WOLF , G.; HAMMES, WP; CARLE , R. (2005). Quality of minimally processed carrots as affected by warm water washing and chlorination. *Innovat. Food Science. Emerg. Technol.*, 6: 351 - 362

KOMAKI, Y.; SIMPSON, A.M.A. ; CHOE, J.K.; PLEWA, M.J.; MITCH , W.A. (2018). Chlorotyrosines versus volatile by-products from chlorine disinfection during washing of spinach and lettuce. *Environ. Sci. Technol.* , 52 ( 16 ) : 9361 - 9369.

KRAMER, M.D. ; LYNCH, CF ; ISACSON, P .; HANSON, JW. (1992). La asociación del cloroformo a base de agua con el retraso del crecimiento intrauterino. *Epidemiología* 3 : 407 - 413.

LEE, S.C.; GUO , H.; LAM, S.M.; LAU , S.L. (2004). Multipathway risk assessment on disinfection by-products of drinking water in Hong Kong. *Environ. Res.* , 94 ( 1 ): 47 - 56.

LEE,W.N.; HUANG , C.H.; ZHU , G. (2018). Analysis of 40 conventional and emerging disinfection by-products in fresh-cut produce wash water by modified EPA methods. *Food Chem.*, 256: 319 - 326

LIANOU,A.; KOUTSOUMANIS, K.P.;SOFOS , J.N. (2012). 20- Organic acids and other chemical treatments for microbial descontamination of food, en *Microbial Decontamination in the Food Industry*, Woodhead Publishing, 592 - 664.

LIN, T.F.; HOANG, S.W. (2000). Inhalation exposure to THMs from drinking water in south Taiwan. *Sci. Total Environ.* , 246 ( 1 ): 41 - 49.

LÓPEZ-GÁLVEZ, F.; ANDÚJAR, S.; MARÍN, A.; TUDELA, J.A.; ALLENDE, A.; GIL, A. (2018). Disinfection by-products in baby lettuce irrigated with electrolysed water. *J. Sci. Food Agric.*, 98 : 2981 - 2988

LYNBERG, M.; NUCKOLS, J.R.; LANGLOIS, P.; ASHLEY, D.; SINGER, P., MENDOLA, P.; WILKES, C.; KRAPFL, H.; MILES, E.; SPEIGHT, V.; LIN, B.; SMALL, L.; MILES, A.; BONIN, M.; ZEITZ P.; TADKOD, A.; HENRY, J.; FORRESTER M.B. (2001). Assessing exposure to disinfection by-products in women of reproductive age living in Corpus Christi, Texas, and Cobb county, Georgia: descriptive results and methods. *Environment. Health Perspect.*, 109: 597–604.

MEIRELES, A. ;GIAOURIS, E.;SIMOES , M. (2016).Alternative disinfection methods to chlorine for use in the fresh-cut industry. *Food Res.*, 82: 71 - 85.

MESUT, G.; CEYDA E.; SAIT C.S. (2019). Multi-route – Multi-pathway exposure to trihalomethanes and associated cumulative health risks with response and dose addition. *Journal of Environmental Management*, 233: 823-831.

MINASHREE K.; GUPTA, S.K.; MISHRA, B.K. (2015). Multi-exposure cancer and non-cancer risk assessment of trihalomethanes in drinking water supplies – A case study of Eastern region of India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 113: 433-438.

NAZIR, M.;KHAN, F.I. (2006). Human health risk modeling for various exposure routes of trihalomethanes (THMs) in potable water supply. *Environ. Modelling & Software* , 21 ( 10 ): 1416 - 1429.

NIEUWENHUIJSEN M.J.;TOLEDANO M.B.; EATON N.E.; FAWELL J.; ELLIOTT P. (2000). Chlorination disinfection byproducts in water and their association with adverse reproductive outcomes: a review. *Occup. Environ. Med.*, 57 (2): 73–85.

NIEUWENHUIJSEN, M.J.; GRELLIER, J.;SMITH, R.; ISZATT, N.; BENNETT, V; BEST, N. et al., (2009a). The epidemiology and possible mechanisms of disinfection by-products in drinking water. *Philos Trans A Math. Phys. Eng. Sci.*, 367: 4043-4076.

NIEUWENHUIJSEN, M.J.; MARTÍNEZ, D.; GRELLIER, J.;BENNETT, J.; BEST, N.; ISZATT, N.et al. (2009 b). Chlorination disinfection by-products in drinking water and congenital anomalies: review and meta-analyses. *Environ. Health Perspect.*, 117 (10): 1486-1493.

NIKOLAOU A.D.; LEKKAS T.D.; GOLFINOPOULOS S.K.; KOSTOPOLOU M.N. (2002) Application of different analytical methods for determination of volatile chlorination by-products in drinking water. *Talanta* 56: 717-726.

ÖLMEZ, H.; KRETZSCHMAR, U. (2009). Métodos de desinfección alternativos potenciales para la industria de corte fresco orgánico para minimizar el consumo de agua y el impacto ambiental. *LWT - Ciencia y tecnología de los alimentos*, 42 ( 3 ) : 686 - 693.

OMS - Organización Mundial de la Salud (2000). Desinfectantes y subproductos desinfectantes. Ginebra: - Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente 36-37

PÉREZ P.J.L.; HERRERO S.; GARCÍA C.; MORENO B. (2008). Determination of trihalomethanes in water samples: a review. *Anal. Chim.Acta.* 629: 6-23.

PINTO, MARTA LARANJEIRO Y BALTAZAR, ANA LÚCIA. (2020). Presencia de trihalometanos en el agua: peligros potenciales. *Acta Port Nutr.*, 21: 32-37.

PLEWA MJ, WAGNER ED. (2004). Chemical and biological characterization of newly discovered iodoacid drinking water disinfection by-products. *Environ. Sci. Technol.* 38: 4713-4722.

QADAFI, M.; S. NOTODARMOJO, S.; ZEVI, Y. (2020). Efectos del tiempo de pre-ozonización de las microburbujas y el pH sobre la formación de trihalometanos y ácidos haloacéticos en tratamientos de agua de turba tropical a escala piloto para fines de agua potable, *Sci. Total Environ.*, 747 :141-540.

QADAFI, M.; S. NOTODARMOJO, S.; ZEVI, Y. (2021). Performance of microbubble ozonation on treated tropical peat water: Effects on THM4 and HAA5 precursor formation based on DOM hydrophobicity fractions. *Chemosphere*, 279.

RAHMAN, MB ; DRISCOLL, T .; COWIE, C .; ARMSTRONG, BK. (2010). Disinfection by-products in drinking water and colorectal cancer: a meta-analysis. *International Journal of Epidemiology*, 39 : 733 - 745.

RAHMAN, M.B. ; COWIE, C.; DRISCOLL, T .; SUMMERHAYES, R.J. ; ARMSTRONG, B.K. ; CLEMENTS, M.S. (2014). Colon and rectal cancer incidence and water trihalomethane concentrations in New South Wales, Australia . *BMC Cancer* 14 : 445.

RAMOS, B.; MILLER, F.A.; BRANDÃO, T.R.S. ; P. TEIXEIRA,P. ; SILVA C.L.M. (2013). Fresh fruits and vegetables—An overview on applied methodologies to improve its quality and safety. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 20 : 1 - 15

REGLI, S.; CHEN, J .; MESSNER, M.; ELOVITZ, MS ; LETKIEWICZ, FJ. ; PEGRAM, RA. ; PEPPING, TJ. ; RICHARDSON, SD. ; WRIGHT, JM. (2015). Estimating potential increased bladder cancer risk due to increased bromide concentrations in sources of disinfected drinking waters. *Environ Sci Technol.*, 49 :13094 - 13102.

RICHARDSON,SD.; PLEWA, MJ.; WAGNER , ED.; SCHOENY, R.; DEMARINI, DM. (2007). Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research. *Mutat. Res.* , 636 : 178 - 242.



RICO, D.; MARTIN-DIANA, A. B.; BARAT, J. M.; BARRY-RYAN, C. (2007). Extending and measuring the quality of fresh-cut fruit and vegetables: a review. *Trends Food Sci. Technol.*, 18: 373–386.

RITT, B. S.; FERNANDES, A. L. T.; THEDEI, G., JÚNIOR. (2021). Comparative analysis between the chlorination and ultraviolet radiation methods for the disinfection of bacteria-contaminated water. *Revista Ambiente & Água*, 16(2): 1-9.

RODRÍGUEZ, M., J.; RODRÍGUEZ, G.; SERODES, J.; SADIQ, R. (2007). Subproductos de la desinfección del agua potable: formación, aspectos sanitarios y reglamentación. *Interciencia*, 32 (11): 749-756.

ROSETO, M. M.; AGUIRRE, M.; PEZO, D.; TABORDA, G.; DUSSÁN, C.; NERIN, C. (2012). Solventless microextraction techniques for determination of trihalomethanes by gas chromatography in drinking water. *Water Air Soil Pollut.*, 223: 667–78.

SAGONG, H.-G.; LEE, S.-Y.; CHANG, P.-S.; HEU, S.; RYU, S.; CHOI, Y.-J.; KANG, D.-H. (2011). Combined effect of ultrasound and organic acids to reduce *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* on organic fresh lettuce. *Journal of Food Science*, 71 (3): 83-87.

SELMA, M.V.; BELTRÁN, D.; ALLENDE, A.; CHACÓN-VERA, E.; GIL, MI. (2007). Eliminación por ozono de *Shigella sonnei* en lechuga rallada y agua. *Microbiología de los alimentos*, 24 (5) : 492 - 499

SELMA, MV.; ALLENDE, A.; LÓPEZ-GÁLVEZ, F.; CONESA, MA.; GIL, MI. (2008). Disinfection potential of ozone, ultraviolet-C and their combination in wash water for the fresh-cut vegetable industry. *Food Microbiology*, 25: 809-814

SHEN, C.; NORRIS, P.; WILLIAMS, O.; HAGAN, S.; LI, K. (2016). Generation of chlorine by-products in simulated wash water. *Food Chem.*, 190: 97 - 102.

SHAMA, G. (2014). Ultraviolet light, en: *Encyclopedia of food microbiology* 2nd ed., Academic Press, Oxford, 665-671.

SIDDIQUE, A.; SAIED, S.; MUMTAZ, M.; HUSSAIN, MM.; KHWAJA, HA. (2015). Multipathways human health risk assessment of trihalomethane exposure through drinking water. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 116 :129 - 136.

SIMÕES, C.; MENDES, S.; MARTINS, A.; GIL, M.M. (2020). Risk assessment of trihalomethanes exposure by consumption of IV gamma products: Evidences from a Portuguese regional survey. *Toxicology Reports*, 7: 288-295.

SINGH, R. (2015). *Membrane Technology and Engineering for Water Purification, Application, Systems Design and Operation* (2nd ed. ), Butterworth-Heinemann. Oxford,1 - 80.

R.J. SUMMERHAYES, R.J.;RAHMAN, B. ; MORGAN,G.G.; BERESIN,G.; MORENO, C.; WRIGHT, J.M. (2021). Meta-analysis of small for gestational age births and disinfection byproduct exposures. *Environmental Research*, 196.

THIRIAT, N.; PAULUS,H.; LE BOT, B.; GLORENNEC, P. (2009). Exposure to inhaled THM: comparison of continuous and event-specific exposure assessment for epidemiologic purposes. *Environ. Int.*, 35 ( 7): 1086 - 1089.

USEPA (2018)

<https://www.epa.gov/iris> (2018), Accessed 1st Jan 2018

UYAK V. ; KOYUNCU I.; OKTEM I.; CAKMAKCI M.; TOROZ I. (2008). Removal of trihalomethanes from drinking water by nanofiltration membranes. *Journal of Hazardous Materials*, 152 (2): 789-94.

VALLEJO VARGAS, OLGA I ; BELTRÁN, LEONARDO ; FRANCO, PAOLA ; MONTOYA NAVARRETE, CARLOS H ; ALZATE RODRÍGUEZ, EDWIN JHOVANY ; REYES, HENRY. (2016). Determinación de trihalometanos en aguas de consumo humano por microextracción en fase sólida- cromatografía de gases en Pereira, Colombia. *Revista colombiana de química*,44 (1): 23-29.

VILLANUEVA, CM. ; CORDIER, S.; FONT-RIBERA, L.; SALAS, LA. ; LEVALLOIS, P. (2015). Overview of Disinfection By-products and Associated Health Effects. *Curr. Envir. Health. Rpt.*, 2: 107–115 2.

VURMA, M.; , PANDIT, R.B.; SASTRY, S.K.; YOUSEF, A.E. (2009). Inactivación de Escherichia coli O157: H7 y microbiota natural en hojas de espinaca utilizando ozono gaseoso durante el enfriamiento al vacío y el transporte simulado *Journal of Food Protection* , 72 ( 7 ) : 1538 - 1546.

ZENG, W.; JIA W.; LUO, H.; YANG, G., YANG, G.; ZHANG, Z. (2020). Microbubble-dominated mass transfer intensification in the process of ammonia-based flue gas desulfurization. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 59: 19781 - 19792.

ZHANG C.; LI C.; ZHENG X.; ZHAO J.; HE G.; ZHAND T. (2017). Effect of pipe materials on chlorine decay, trihalomethanes formation, and bacterial communities in pilot-scale water distribution systems. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 14: 85-94

## 11. Anexos

### 1. Método EPA 551. Determinación de trihalometanos

#### Método EPA US 551.1

**Columna A:** HP-1ms Ultra Inert  
19091S-733UI  
30 m x 0,25 mm, 1,00 µm

**Columna B:** DB-1301  
122-1333  
30 m x 0,25 mm, 1,00 µm

Portador: Agilent 7890A GC  
Muestreador: Agilent 7683B, jeringa de 5,0 µl  
(n.º de referencia de Agilent 5181-1273),  
inyección splitless de 0,5 µl

Portador: Flujo de constante de helio de 25 cm/s  
Inyector: Splitless, 200 °C, flujo de purga de  
20 ml/min a 0,25 min

Portador: Tubo de sílice fundida desactivado de alta  
temperatura de 1 m, 0,32 mm (d.i.)  
(n.º de referencia de Agilent 160-2855-5)

Horno: De 33 °C (14 min) a 60 °C (5 °C/min),  
retención de 5 min, de 15 °C/min a 275 °C,  
retención de 20 min

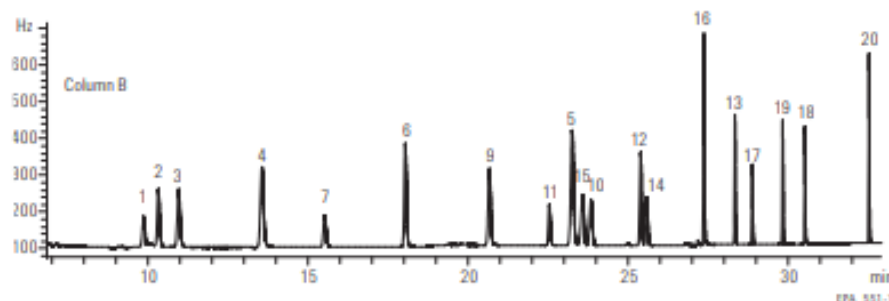
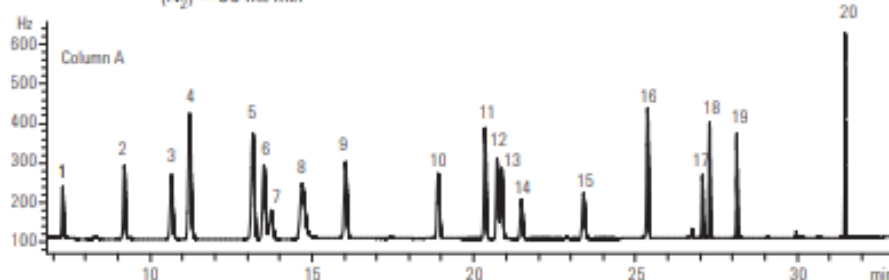
Detector: µECD G2397A dual, 300 °C, col. const. + auxiliar  
(N<sub>2</sub>) = 30 ml/min

#### Consumibles sugeridos

Séptum: Septa verdes avanzados de 11 mm, 5183-4759

Liner: Conexión directa, doble punta, desactivado,  
4 mm d.i., G1544-80700

Jeringa: Afilada de 5 µl, FN 23-26s/42/HP, 5181-1273



1. Cloroformo
2. 1,1,1-tricloroetano
3. Tetracloruro de carbono
4. Tricloroacetnitrilo
5. Dicloroacetnitrilo
6. Bromodiclorometano
7. Tricloroetileno
8. Hidrato cloral
9. 1,1-dicloro-2-propanona
10. 1,1,2-tricloroetano
11. Cloropicrina
12. Dibromodiclorometano
13. Bromocloroacetnitrilo
14. 1,2-dibromoetano
15. Tetracloroetileno
16. 1,1,1-tricloro-2-propanona
17. Bromoformo
18. Dibromoacetnitrilo
19. 1,2,3-tricloropropano
20. 1,2-dibromo-3-cloropropano

Esta aplicación demuestra la utilidad de la columna HP-1ms Ultra Inert para el análisis principal de disolventes clorados, trihalometanos y productos residuales de desinfección según EPA 551.1. La excelente forma de los picos del hidrato cloral y la resolución entre el bromodiclorometano y el tricloroetileno demuestran la inercia de la columna HP-1ms Ultra Inert, por lo que resulta ideal para los análisis según el método EPA 551.1.