

# OZONIZACIÓN Y CLORACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA COMPARATIVA SOBRE EFICIENCIA, FORMACIÓN DE SUBPRODUCTOS Y CUMPLIMIENTO NORMATIVO

## OZONATION AND CHLORINATION IN DRINKING WATER TREATMENT: A COMPARATIVE BIBLIOGRAPHIC REVIEW ON EFFICIENCY, BY-PRODUCT FORMATION, AND REGULATORY COMPLIANCE

Lizbeth Fernanda Prieto Bravo<sup>1</sup>, Luis Fernando Sánchez Rezavala<sup>2</sup>, Valery Nohemie Argudo Bajaña<sup>3</sup>

{[lizabethprietob@gmail.com](mailto:lizabethprietob@gmail.com)<sup>1</sup>, [rezavalaluis97@gmail.com](mailto:rezavalaluis97@gmail.com)<sup>2</sup>, [valerynohemie@gmail.com](mailto:valerynohemie@gmail.com)<sup>3</sup>}

Fecha de recepción: 14/03/2026 / Fecha de aceptación: 23/03/2026 / Fecha de publicación: 31/03/2026

**RESUMEN:** El acceso a agua potable segura constituye un elemento esencial para la protección de la salud pública y la reducción de enfermedades transmitidas por el agua. Los procesos de desinfección representan una fase clave dentro del tratamiento del agua, debido a que permiten eliminar o inactivar los microorganismos patógenos que pueden encontrarse en las fuentes de abastecimiento. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran la cloración y la ozonización, las cuales presentan diferencias en su eficacia microbiológica, persistencia en la red de distribución y formación de subproductos de desinfección. El presente estudio compara los procesos de cloración y ozonización aplicados al tratamiento de agua potable, evaluando su eficacia de desinfección, la formación de subproductos de desinfección (DBPs) y su relación con los criterios regulatorios de calidad del agua. La investigación se desarrolló mediante una revisión bibliográfica sistemática de literatura científica publicada entre 2020 y 2025 en bases de datos académicas. Inicialmente se identificaron 312 estudios relacionados con la temática, de los cuales 25 fueron seleccionados para el análisis final tras aplicar criterios de inclusión basados en la relevancia temática y calidad metodológica. Los resultados evidencian que ambos procesos presentan alta eficacia en la inactivación de microorganismos, evaluada mediante el parámetro CT (concentración vs tiempo). La ozonización mostró mayor capacidad oxidante,

<sup>1</sup>Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Estatal de Milagro (UNEMI), Cda. Universitaria Km 1.5 vía Km 26, Milagro, Ecuador, <https://orcid.org/0009-0001-4060-5931>.

<sup>2</sup>Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Estatal de Milagro (UNEMI), Cda. Universitaria Km 1.5 vía Km 26, Milagro, Ecuador, <https://orcid.org/0009-0000-6962-2367>.

<sup>3</sup>Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Estatal de Milagro (UNEMI), Cda. Universitaria Km 1.5 vía Km 26, Milagro, Ecuador. <https://orcid.org/0009-0008-3616-090X>.

permitiendo una inactivación más rápida de virus, bacterias y protozoos. Sin embargo, la cloración continúa siendo ampliamente utilizada debido a su capacidad para mantener un residual desinfectante en la red de distribución. En cuanto a los subproductos, la cloración presentó mayor tendencia a generar trihalometanos (THMs) y ácidos haloacéticos (HAAs), mientras que la ozonización produce principalmente compuestos carbonílicos y puede generar bromato en presencia de bromuros. En conclusión, ambos procesos pueden cumplir con los estándares de calidad del agua potable cuando se aplican bajo condiciones operativas controladas.

*Palabras clave: Cloración, ozonización, agua potable, desinfección y subproductos de desinfección*

**ABSTRACT:** Access to safe drinking water is essential for protecting public health and reducing waterborne diseases. Disinfection processes represent a key phase in water treatment, as they eliminate or inactivate pathogenic microorganisms that may be present in water sources. Among the most widely used technologies are chlorination and ozonation, which differ in their microbiological efficacy, persistence in the distribution network, and formation of disinfection byproducts. This study compares chlorination and ozonation processes applied to drinking water treatment, evaluating their disinfection efficacy, the formation of disinfection byproducts (DBPs), and their relationship to regulatory water quality criteria. The research was conducted through a systematic review of scientific literature published between 2020 and 2025 in academic databases. Initially, 312 studies related to the topic were identified, of which 25 were selected for the final analysis after applying inclusion criteria based on thematic relevance and methodological quality. The results show that both processes are highly effective in inactivating microorganisms, as evaluated by the CT parameter (concentration vs time). Ozonation demonstrated greater oxidizing capacity, enabling faster inactivation of viruses, bacteria, and protozoa. However, chlorination continues to be widely used due to its ability to maintain a residual disinfectant in the distribution network. Regarding byproducts, chlorination showed a greater tendency to generate trihalomethanes (THMs) and haloacetic acids (HAAs), while ozonation primarily produces carbonyl compounds and can generate bromate in the presence of bromides. In conclusion, both processes can meet drinking water quality standards when applied under controlled operating conditions.

*Keywords: Chlorination, ozonation, drinking water, disinfection and disinfection by-products.*

## INTRODUCCIÓN

El acceso a agua potable segura constituye un elemento fundamental para la salud pública, la calidad de vida de la población y el desarrollo socioeconómico de las sociedades, es importante el desarrollo de métodos que aseguren la inocuidad del líquido vital para contrarrestar las enfermedades por agua contaminada químicamente o bacteriológicamente (1).

En 2015, las Naciones Unidas establecieron, dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), la meta de garantizar que todos tengan acceso a agua potable cuando sea necesario; también se asegura que esta agua esté libre de contaminación microbiológica o química. (2). No obstante, a pesar de estos esfuerzos y su inclusión en los ODS, el acceso a agua de calidad continúa siendo uno de los principales desafíos globales, tal como se indica en (3), debido a que aproximadamente 1700 millones de personas utilizan agua contaminada, lo que incrementa el riesgo de enfermedades de transmisión hídrica.

Las técnicas de desinfección constituyen una serie de fases esenciales en el procedimiento de purificación del agua potable. El uso adecuado de estos tratamientos facilita la erradicación de microorganismos patógenos que representan un riesgo para la salud. Como resultado, es posible asegurar que se cumplen las regulaciones internacionales (4). Un factor importante a considerar es la correcta limpieza en las redes de distribución de agua, es importante debido a que el agua puede ser objeto de re-contaminación o incluso mostrar proliferación de microorganismo.

A día de hoy, la cloración ha sido uno de los tratamientos de desinfección de agua potable gracias a su bajo costo de implementación, facilidad de manipulación y su capacidad de conservar en la red de distribución un residual desinfectante (6). Este método por lo general emplea al adicionar cloro gaseoso, hipoclorito de sodio o hipoclorito de calcio, los cuales, al en presencia de una solución acuosa se genera el ácido hipocloroso y el ion hipoclorito, quienes son los encargados del proceso de inactivación de microorganismo por medio la oxidación de componentes celulares esenciales (7). No obstante, al reaccionar el cloro con la materia orgánica presente, puede generar subproductos de desinfección, los cuales han sido asociados a efectos contraproducentes a la salud humana, cuando se encuentran en altas concentraciones (8),(9).

Por otro lado, el proceso de ozonización, se ha destacado como alternativa de la cloración, debido a su alto poder oxidante y a su capacidad para inactivar diversos microorganismos, tales como, virus y protozoos, los cuales suelen ser más resistentes a la cloración (10). El Ozono, al ser un fuerte agente oxidante, actúa directamente sobre las membranas celulares de los microorganismos (11), y al mismo tiempo, produce radicales hidroxilos altamente reactivos, que ayudan a descomponer compuestos orgánicos complejos presentes en el agua(12).

Es por ello que, es importante comparar distintos métodos de desinfección convencionales y avanzados, teniendo en cuenta su desempeño y eficacia frente a estos compuestos, así como también, conocer cómo se pueden ver influenciadas por variables operativas y ambientales, tales como pH, temperatura, concentración de materia orgánica y tiempo de contacto con el desinfectante, en el tratamiento del agua potable (13).

Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo comparar los procesos de cloración y ozonización aplicados al tratamiento de agua potable, analizando su eficacia de desinfección, la formación de subproductos asociados y su relación con los marcos regulatorios vigentes, con especial énfasis en el cumplimiento de los criterios de calidad establecidos para el agua destinada al consumo humano.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo-descriptivo con diseño de revisión bibliográfica sistemática, orientada a comparar la eficiencia de la cloración y la ozonización en el tratamiento de agua potable, así como su formación de subproductos y el cumplimiento de la normativa ecuatoriana NTE INEN 1108:2020. Con el fin de fortalecer la validez metodológica, el proceso se estructuró en cuatro fases secuenciales y verificables, descritas a continuación.

### Estrategia de búsqueda y fuentes de información

Se realizó una búsqueda minuciosa de artículos científicos, informes técnicos, normativas y regulaciones en repositorios académicos tales como Science Direct, PubMed, Google Scholar, Scielo y otras revistas destacadas en áreas de salud pública, tratamiento de agua potable, química ambiental y normativas sanitarias tanto nacionales como internacionales. Se utilizaron descriptores bilingües combinados con operadores booleanos "Keywords: ("Ozonización" OR "Ozone") AND ("Cloración" OR "Chlorination") AND ("Subproductos" OR "DBPs") AND ("Agua Potable" OR "Drinking Water").

Además, se emplearon términos adicionales: "THM formation", "HAA", "bromate formation", "oxidant demand" y "CT value".

La investigación se centró en artículos publicados desde 2020 hasta 2025, con el objetivo de añadir información actualizada y desarrollos actuales en la sanitización y gestión de subproductos. Esto incluyó el uso de bases de datos de la Organización Mundial de la Salud y diversas revistas sobre salud pública internacional.

### Criterios de inclusión y exclusión

Para asegurar la pertinencia y el rigor metodológico de la revisión, se establecieron criterios claros de selección de la literatura. Se incluyeron únicamente aquellos estudios que comparan de manera directa los procesos que están en estudio (la cloración y la ozonización), así como investigaciones que reportan la formación de subproductos relevantes como THMs, HAAs y bromatos. También se consideraron artículos que presentan datos cuantitativos vinculados al proceso de desinfección, tales como valores CT y persistencia del residual desinfectante. Se priorizaron publicaciones recientes alineadas con lineamientos de organismos como la OMS u otras revistas de salud pública global, y que cuenten con revisión por pares y acceso completo para garantizar su verificabilidad. Por el contrario, se excluyeron estudios relacionados con el tratamiento de aguas residuales industriales o fuentes no destinadas al consumo humano, así como trabajos que no presentan análisis de subproductos ni una metodología claramente definida. Asimismo, se descartaron publicaciones anteriores al año 2020, documentos duplicados y aquellos que no ofrecen respaldo científico suficiente para sustentar el análisis comparativo.

### **Proceso de selección de artículos científicos o revistas de gran impacto**

La revisión bibliográfica se desarrollará mediante un proceso de cribado ejecutado en dos etapas consecutivas. En la primera fase se realizará una lectura de títulos y resúmenes, lo que permitirá descartar de manera preliminar aquellos estudios que no abordaban directamente el tratamiento de agua potable o que no presentaban información relacionada con la formación de subproductos, eficacia de desinfección y/o el cumplimiento normativo. En la segunda fase se llevará a cabo la lectura completa de los textos seleccionados, evaluando la calidad metodológica de cada estudio, su relevancia técnica y la coherencia de sus resultados con los objetivos planteados en esta investigación.

### **Variables de análisis comparativo**

Para llevar a cabo la comparación de ambos métodos, se investigaron dos aspectos técnicos claves 2.2.1. Eficacia de desinfección (Modelo CT). La evaluación de la efectividad de los métodos de desinfección no se efectuará de manera aleatoria, sino a través del uso del modelo cinético desarrollado por Watson-Chick, que se emplea en la ingeniería sanitaria para detallar cómo se inactivan los microorganismos durante la desinfección del agua. Este modelo indica que se puede medir la efectividad del procedimiento a través del valor CT, que se define como el producto entre la cantidad de desinfectante (C, mg/L) y el tiempo de contacto efectivo (T, min) al que los microorganismos están sometidos. En este análisis, se considerarán distintas concentraciones del desinfectante, estudiando su vinculación con el tiempo de contacto requerido para lograr ciertos grados de inactivación microbiana. De este modo, el uso del valor CT posibilita una comparación técnica estandarizada de la efectividad de las concentraciones utilizadas.

### **Evaluación de la Reactividad Química y Formación de Subproductos (DBPs)**

La evaluación de la reactividad química se enfocó en reconocer las rutas de producción de los principales subproductos que emergen de cada método de desinfección. En el caso de la cloración, se aplicó el enfoque de Potencial de Formación de Trihalometanos (THMFP) para interactuar con la materia orgánica natural y generar compuestos como los THMs y los HAAs.

Este método facilita la evaluación del comportamiento del agua en relación con la formación de subproductos regulados bajo diversas condiciones operativas. En cuanto a la ozonización, el estudio se sustentó en la cinética de producción de bromatos ( $\text{BrO}_3^-$ ), analizando la oxidación de bromuros en función del pH, la cantidad de ozono utilizada y la presencia de radicales oxidantes. Esta caracterización permite valorar la posibilidad de que se generen bromatos y comprobar si los niveles obtenidos se ajustan a las normativas vigentes.

## RESULTADOS

### Búsqueda de información

Se realizó la búsqueda de artículos relacionados a la eficiencia, formación de subproductos en el tratamiento de agua potable a partir de la Ozonización y la Cloración, en las cuales se identificaron inicialmente un total de 312 proyectos. Como primer filtro se implementó la revisión de los proyectos revisados sean de carácter científico y que se encuentren dentro del rango fecha de publicación y también garantizar que se encuentren alineadas al tema de interés, obteniendo parcialmente 115 documentos para revisar. Posteriormente, se aplicaron filtros para delimitar los artículos de carácter que poseían información duplicada, títulos y resúmenes, de la cual, parcialmente se obtuvieron 45 documentos. Por último, se seleccionó 25 artículos de carácter científico para realizar el análisis comparativo de la eficacia del proceso de desinfección y la formación de subproductos de los tratamientos de Cloración y Ozonización.

### Eficacia de desinfección

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la revisión bibliográfica realizada, en la cual se recopilan diversos estudios que analizan la eficacia de los procesos de desinfección mediante cloración y ozonización en el tratamiento de agua.

**Tabla 1. Comparación de resultados reportados en la literatura sobre la eficacia de desinfección de la cloración y la ozonización.**

Fuente bibliográfica	Proceso de desinfección	Microorganismo	CT (mg*min/L)	Observaciones
Cheswick et al., 2020	Cloración	<i>E. Coli</i>	0.24 – 2.0	Incremento de CT en donde aumenta constantemente la cinética
Kong et al., 2021	Cloración / Ozonización	Virus N.E.	<10	Influencia significativa de pH y temperatura
Ocampo-Rodríguez et al., 2022	Cloración	Bacterias	50 – 900	Dependencia de pH, DBO y materia orgánica
Saguti et al., 2023	Cloración	Virus N.E.	1.5 – 1.8	Inactivación rápida en los primeros minutos de aplicación

**OZONIZACIÓN Y CLORACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA COMPARATIVA SOBRE EFICIENCIA, FORMACIÓN DE SUBPRODUCTOS Y CUMPLIMIENTO NORMATIVO**

---

Carvalho Costa et al., 2024	Ozonización	Virus / bacterias	1.60 – 13.62	Mayor CT, mayor resistencia de virus y bacterias y mayor formación de DBPs
Dowdell et al., 2023	Cloración	Microorganismos totales	0.57 – 1.79	Evaluado en planta real
Zimoch et al., 2025	Cloración	<i>E. coli</i>	5 – 25	Influencia de biofilm en tuberías
Gregov et al., 2025	Cloro	<i>Pseudomonas peli</i>	51 – 90	Alta resistencia al cloro

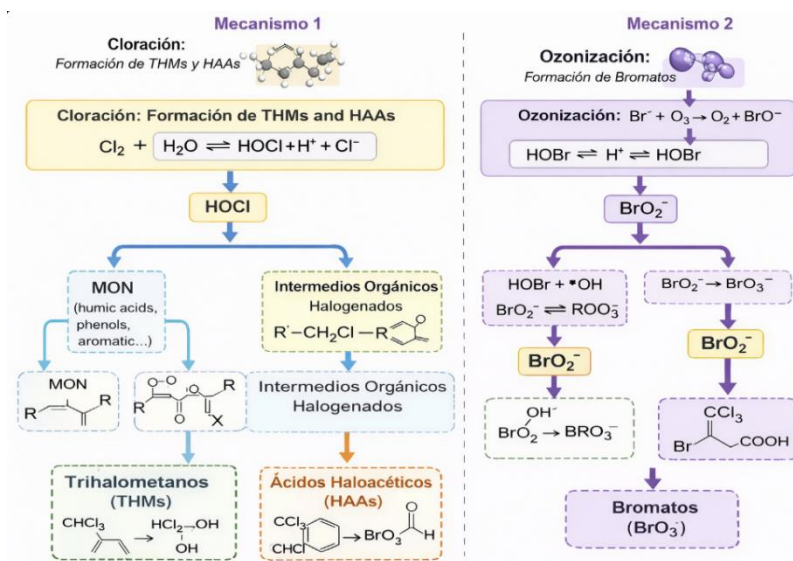
***Nota: Propia autoría.***

La información recopilada evidencia que el parámetro CT (concentración x tiempo) es un indicador fundamental para evaluar la eficacia de los procesos de desinfección en el tratamiento de agua potable. Los estudios analizados muestran que tanto la cloración como la ozonización pueden lograr reducciones significativas de microorganismos, aunque los valores de CT requeridos varían dependiendo del tipo de desinfectante, del microorganismo objetivo y de las condiciones fisicoquímicas del agua. En general, se observa que valores relativamente bajos de CT pueden generar inactivaciones rápidas en bacterias y virus, mientras que algunos microorganismos presentan mayor resistencia y requieren exposiciones más altas al compuesto de desinfección. Asimismo, diversos estudios resaltan que factores operativos como pH, temperatura, materia orgánica y presencia de biofilm en tuberías influyen directamente en la eficiencia del proceso. Estos resultados confirman que el control adecuado del CT y de las condiciones de operación es clave para optimizar la desinfección y garantizar la seguridad microbiológica del agua potable.

**Evaluación de la Reactividad Química y Formación de Subproductos (DBPs).**

En la imagen 1 muestra dos mecanismos de reacción en la desinfección del agua; el mecanismo 1 es la cloración, en donde el cloro reacciona con la materia orgánica formando THMs y HAAs; y el mecanismo 2 que es la ozonización, en donde el ozono oxida el bromuro generando bromato ( $\text{BrO}_3^-$ ) como subproducto principal.

**OZONIZACIÓN Y CLORACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA COMPARATIVA SOBRE EFICIENCIA, FORMACIÓN DE SUBPRODUCTOS Y CUMPLIMIENTO NORMATIVO**



**Figura 1. Comparación visual de los mecanismos de reacción de los procesos de desinfección del agua: Cloración y ozonización.**

**Fuente: Propia autoría.**

En la Tabla 2 se muestra el nivel de toxicidad de los principales subproductos de desinfección generados durante las etapas de cloración y ozonización, los cuales pueden formarse cuando existen compuestos orgánicos presentes en el agua sometida a tratamiento.

**Tabla 2. Comparación de resultados reportados en la literatura sobre la eficacia de desinfección de la cloración y la ozonización.**

DBP	Proceso de formación	Subproductos principales	Nivel de toxicidad
Trihalometanos (THMs)	Cloración	Cloroformo, Bromoformo	Normal
Ácidos haloacéticos (HAAs)	Cloración	DCAA, TCAA	Alto
Haloacetónitrilos (HANs)	Cloración/Preozonización	DCAN, BCAN	Alto
Ácidos carboxílicos	Ozonización	Acético, fórmico, oxálico	Bajo-moderado

**Fuente: Propia autoría.**

De acuerdo con los datos recopilados, la formación de subproductos de desinfección (DBPs), se encuentra estrechamente relacionada tanto con el método de desinfección empleado, como con

la interacción entre el desinfectante y los compuestos orgánicos presentes en el medio. La cloración, al entrar en contacto con la materia orgánica tiende a generar una mayor cantidad de compuestos halogenados como trihalometanos (THMs) y ácidos haloacéticos (HAAs), los cuales presentan niveles de toxicidad que varían de moderados a altos. Por otro lado, la ozonización, es propenso a formar compuestos como ácidos carboxílicos y otros subproductos oxigenados, cuyos niveles de toxicidad son menores. Debido a esto, es necesario destacar la importancia de realizar controles tanto en las condiciones de operación del tratamiento como en la calidad del agua; con el objetivo de limitar y disminuir la generación de DBPs durante el tratamiento de sanitización.

## DISCUSIÓN

### Eficacia de desinfección

El proceso de cloración arrojó diversos estudios en los cuales se ha demostrado que el incremento del valor CT está directamente asociado con una mayor tasa de inactivación microbiana. Según la investigación (14) evaluaron experimentalmente la desinfección del agua potable por medio del proceso de cloración aplicados tanto a cultivos de *E. coli* y a otros microorganismos procedentes de agua cruda o real de plantas de tratamientos. Al momento de realizar estos experimentos se aplicaron distintas concentraciones de cloro libre de entre 0.12 y 1.0 mg/L en distintos tiempos de exposición, evaluando la cinética de inactivación de la bacteria mediante la citometría de flujo para cuantificar células intactas y dañadas debido a la exposición del desinfectante. Los resultados evidenciaron una relación directa entre la dosis de cloro y la velocidad de inactivación bacteriana, observando reducciones cercanas a 2 unidades Log. de *E. coli* en aproximadamente 2 minutos bajo concentraciones dentro de ese rango. De esta manera, el incremento de la concentración de cloro generó un aumento en la constante cinética de inactivación, con valores que oscilaron aproximadamente entre 0.32 y 3.14 L·mg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>, lo que confirmó que los valores de CT incrementan la eficiencia del proceso de desinfección.

De manera complementaria, estudios de revisión han señalado que la eficacia de la cloración también depende de factores fisicoquímicos que influyen en el valor CT requerido para alcanzar niveles específicos de inactivación microbiológica. Según la investigación de (15) indican que en el agua el cloro se hidroliza formando ácido hipocloroso (HOCl) e ion hipoclorito (OCl<sup>-</sup>), especies responsables de la acción desinfectante. La proporción entre estas especies depende principalmente del pH del agua, siendo el ácido hipocloroso la forma más efectiva en rangos de pH ligeramente ácidos. Asimismo, variables como temperatura, presencia de sólidos suspendidos, demanda química de oxígeno, materia orgánica natural, pueden modificar la demanda de cloro y alterar la exposición efectiva al desinfectante. En general, para la desinfección de aguas residuales o efluentes tratados se emplean concentraciones de cloro entre 5 y 30 mg/L con tiempos de contacto de 10 a 30 minutos, lo que puede generar reducciones microbiológicas entre 3 y 7 log, dependiendo del microorganismo y de las condiciones del agua.

Otros estudios también han podido evaluar la relación entre el valor CT y la inactivación viral en procesos de desinfección química. (16) en su artículo, analizaron la eficacia comparativa de

diferentes tecnologías de desinfección, incluyendo la cloración, ozonización y radiación ultravioleta, para la inactivación de virus en sistemas de tratamiento de agua potable y aguas residuales. Dando como resultados valores de CT inferiores a 10 mg\*min/L que pueden lograr inactivaciones cercanas a 4 log (99.99%) para diversos virus, aunque estos valores varían según el tipo de virus y las condiciones fisicoquímicas del agua. Este estudio también señala que factores como el pH y la temperatura influyen significativamente en la cinética de desinfección; por ejemplo, una disminución de aproximadamente 10 °C puede duplicar el valor CT requerido para alcanzar la misma reducción microbiológica. De la misma manera, (17) reportaron que valores de CT cercanos de entre 1.5-1.8 mg\*min/L para el cloro que permitieron alcanzar reducciones virales superiores a 3 log en los primeros minutos de contacto, lo que se pudo evidenciar la elevada eficacia del desinfectante en condiciones adecuadas de uso.

A pesar de que la cloración es importante en muchos aspectos debido a su importante actividad desinfectante, algunos estudios revisados han identificado la presencia de microorganismos con mayor tolerancia al cloro en sistemas de distribución de agua potable. En el artículo de (18) analizaron la resistencia bacteriana al cloro a partir de una revisión bibliométrica de más de mil estudios científicos, encontrando que ciertas especies pueden requerir valores CT significativamente más elevados para alcanzar niveles de inactivación comparables a los de bacterias indicadoras convencionales. Por ejemplo, para la bacteria *Pseudomonas* peli se reportaron valores de CT entre 51.26 y 90.36 mg\*min/L para lograr una inactivación del 99.9 %, lo que evidencia un grado considerable de resistencia frente a la cloración. Estos resultados sugieren que la presencia de bacterias resistentes puede limitar la eficacia del proceso de desinfección y favorecer la formación de biofilms en redes de distribución, lo que resalta la importancia de aplicar estrategias de tratamiento basadas en múltiples barreras de desinfección.

La ozonización es otra tecnología muy utilizada en el tratamiento del agua potable, principalmente por su gran capacidad oxidante (19), lo que da paso a eliminar o inactivar una amplia variedad de microorganismos presentes en el agua. Diversos estudios han evaluado la eficacia del ozono utilizando también el parámetro CT como indicador de exposición al desinfectante. En el estudio realizado por (20) se llevó a cabo una revisión crítica sobre la desinfección del agua mediante ozono, enfocándose en la eliminación de patógenos transmitidos por el agua. Para ello, los autores analizaron diferentes datos experimentales relacionados con la inactivación de microorganismos como virus entéricos, bacteriófagos MS2, quistes de *Giardia* y ooquistes de *Cryptosporidium*. A partir de esta información, aplicaron modelos cinéticos de primer y segundo orden con el fin de relacionar la reducción logarítmica de los microorganismos con el valor CT. Estos resultados mostraron que muchos virus pueden ser inactivados con niveles relativamente bajos de exposición al ozono. Además, se pudo observar que los protozoos como *Giardia* pueden inactivarse rápidamente durante los primeros minutos de contacto, lo que demuestra la alta capacidad reactiva del ozono frente a ciertos patógenos presentes en el agua.

Diversos estudios han evaluado el proceso de desinfección por ozonización a escala piloto y real. En ese sentido, (21) analizaron la ozonización como proceso de desinfección en agua regenerada utilizando un reactor de flujo pistón, obteniendo valores de CT entre 1.60 y 13.62 mg\*min/L. En estas condiciones se pudieron observar reducciones microbiológicas importantes. En ese sentido,

los coliformes totales disminuyeron entre 2.46 y 2.89 unidades logarítmicas, mientras que la *E. Coli* presentó reducciones de entre 2.03 y 2.18 log. En el caso de virus como el norovirus, la reducción fue incluso mayor, superando las 4 unidades logarítmicas. Con estos resultados los autores evidenciaron la alta eficacia del ozono para la inactivación de bacterias y virus durante el proceso de desinfección. Sin embargo, el estudio también señala que el aumento de la dosis de ozono ( $O_3$ ) puede favorecer la formación de algunos subproductos de desinfección, como bromato y N-nitrosodimetilamina. Por esta razón, los autores destacan la importancia de controlar y optimizar el valor de CT, de manera que se logre una adecuada eliminación de patógenos sin incrementar la generación de compuestos secundarios no deseados.

En sistemas de tratamiento de agua potable a escala real, la eficacia de la ozonización también ha sido evaluada mediante el parámetro CT utilizando metodologías basadas en el modelo Watson-Chick. Según (22) analizaron el desempeño de un reactor de ozonización en una planta de tratamiento mediante citometría de flujo en tiempo casi real, encontrando valores medianos de CT entre 0.57 y 1.79  $mg \cdot min/L$  durante distintos periodos operativos. En condiciones normales, el sistema presentó valores cercanos a 0.75  $mg \cdot min/L$ , mientras que incrementos en la dosis de ozono elevaron el CT hasta aproximadamente 1.79  $mg \cdot min/L$ . Bajo estas condiciones se observaron reducciones microbiológicas de hasta 2.56 log en células microbianas intactas, aunque el estudio señala que la correlación entre CT y reducción microbiana puede verse influenciada por factores hidráulicos del reactor y por características de la calidad del agua.

De acuerdo con la investigación de (23), se evaluó la aplicación de un sistema piloto de ozonización móvil en tuberías de redes de abastecimiento que presentaban diferentes condiciones de envejecimiento. Los resultados mostraron valores de CT que variaron entre 5 y 25  $mg \cdot min/L$ , los cuales estuvieron asociados con reducciones microbiológicas aproximadas de entre 0.5 y 1.5 unidades logarítmicas para coliformes totales y *E. coli*. Los autores se dieron cuenta que la eficiencia del proceso fue mayor en tuberías nuevas en comparación con aquellas que presentaban corrosión o acumulación de depósitos. Esto se debe principalmente a que la presencia de biofilm y material particulado puede consumir parte del ozono disponible, reduciendo así su eficacia durante el proceso de desinfección.

### **Evaluación de la Reactividad Química y Formación de Subproductos (DBPs)**

Los estudios revisados demuestran que la formación de subproductos de desinfección durante el tratamiento de agua potable está directamente relacionada con la reactividad química entre los desinfectantes y la materia orgánica natural (NOM) presente en el agua. Según (24–26), existe una tendencia significativa a la generación de subproductos orgánicos halogenados durante los procesos de cloración, principalmente trihalometanos (THMs) y ácidos haloacéticos (HAAs), cuando hay precursores orgánicos disueltos. El primer grupo de autores mencionan que, bajo condiciones estandarizadas de pH y dosis de cloro, la formación de estos compuestos aumenta con la temperatura, el tiempo de residencia y la disminución progresiva del cloro residual, lo que evidencia la alta susceptibilidad del proceso de cloración a la formación de subproductos de desinfección en presencia de materia orgánica reactiva.

Los resultados cinéticos reportados por (27) muestran que la formación de DBPs en aguas cloradas aumenta significativamente en rangos de temperatura entre 40 °C y 90 °C, observándose picos en compuestos bromados y clorados como dibromoclorometano (DBCM), bromoformo, ácido dibromoacético (DBAA), ácido bromodicloroacético (BDCAA) y cloropicrina, antes de iniciar procesos de degradación térmica. Asimismo, el incremento del tiempo de residencia del agua (2–48 h) favorece la formación sostenida de compuestos como dicloroacetoniitrilo (DCAN), bromocloroacetoniitrilo (BCAN) y dibromoacetoniitrilo (DBAN), incluso en ausencia de incremento térmico adicional. Estos patrones son consistentes con el comportamiento típico esperado bajo condiciones de THMFP, confirmando que la cloración puede generar una amplia gama de DBPs cuando existe NOM disponible.

De manera complementaria, diferentes investigaciones han demostrado que las condiciones fisicoquímicas del agua influyen significativamente en la cinética de formación de DBPs. En particular, el aumento de la temperatura y la presencia de compuestos aromáticos derivados de la NOM favorecen la formación de THMs, observándose correlaciones positivas entre THMFP, temperatura y absorbancia UV254, lo que evidencia el papel de la fracción orgánica aromática como precursor de estos subproductos (24). Asimismo, estudios realizados en sistemas reales de distribución de agua potable han identificado concentraciones de THMs entre aproximadamente 11 y 36 µg/L, generadas por la reacción del cloro residual con la materia orgánica durante el transporte en la red, lo que confirma que la formación de DBPs puede continuar incluso después del tratamiento en planta (26).

Según (28) han aplicado diversas metodologías para la identificación y cuantificación de estos compuestos. Entre ellas, se destacan métodos espectrofotométricos UV-Vis colorimétricos, utilizados como alternativa al análisis mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas para la determinación de THMs. Los autores mencionan que estos métodos han demostrado una adecuada sensibilidad y precisión, con límites de detección cercanos a 13,41 µg/L y recuperaciones superiores al 86 %, que permite evaluar de forma eficiente la formación de subproductos en sistemas de tratamiento de agua potable.

El estudio desarrollado por (29), han demostrado que la diversidad de subproductos generados durante la cloración es considerablemente mayor de lo que se había estimado previamente. El método para la identificación lo desarrollaron mediante espectrometría de masas de ultra alta resolución FT-ICR-MS, en donde se pudieron identificar más de 2800 fórmulas moleculares de compuestos halogenados formados por la reacción entre el cloro y la NOM, lo que evidencia la complejidad química del proceso de desinfección y la presencia de numerosos DBPs no regulados. La literatura reporta que la presencia de compuestos orgánicos específicos o contaminantes emergentes puede incrementar el potencial de formación de DBPs. Por ejemplo, compuestos como el nonilfenol actúan como precursores reactivos durante la cloración, favoreciendo la formación de THM4 y HAA5, especialmente cuando se incrementa el pH y el tiempo de contacto del cloro. Por esta razón se demuestra que la composición química del agua cruda es un factor determinante en la generación de subproductos durante la desinfección (30).

Según (31) menciona que procesos como la ozonización o el sistema que divulga con  $O_3/H_2O_2$  pueden aumentar la liberación de materia orgánica disuelta, particularmente en presencia de partículas como tire wear particles (TWPs). Dando resultado a la disponibilidad de precursores orgánicos, lo que se traduce en mayores concentraciones de DBPs durante la cloración posterior, incluyendo THMs, HAAs, halocetonas (HKs) y halolactonas (HALs), pudiendo duplicarse o incluso cuadruplicarse ciertas concentraciones dependiendo de la dosis de ozono aplicada.

En relación con la ozonización como tecnología de desinfección, diferentes estudios indican que este proceso genera subproductos distintos a los producidos por la cloración. En particular, el ozono y los radicales hidroxilos derivados de su descomposición reaccionan con la NOM produciendo principalmente subproductos carbonílicos, entre los que destacan aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos (CABPs). Estos compuestos se forman mediante procesos de oxidación progresiva de estructuras orgánicas presentes en la NOM y su concentración aumenta con la dosis de ozono y el tiempo de contacto, lo que evidencia la elevada capacidad oxidante del ozono (32).

En el caso de la pre-ozonización seguida de cloración, se ha observado que este tratamiento puede modificar la distribución y toxicidad de los DBPs generados. Aunque la ozonización puede reducir algunos precursores específicos, también puede producir intermediarios orgánicos más reactivos, lo que favorece la formación de subproductos nitrogenados (N-DBPs) como haloacetónitrilos (HANs), tricloronitrometano (TCNM) y halocetonas (HKs) durante la cloración posterior. Estos compuestos presentan un mayor potencial mutagénico y carcinogénico que algunos DBPs regulados, lo que resalta la necesidad de optimizar las condiciones operativas del tratamiento combinado (33).

Varios estudios coinciden en que la cuantificación experimental de DBPs puede subestimar la concentración real de estos compuestos debido a limitaciones en los métodos de preconcentración y extracción. Se ha observado que técnicas basadas en resinas XAD, extracción en fase sólida (SPE) o intercambio de solventes pueden presentar recuperaciones inferiores al 20 % para THMs y HAAs, mientras que los compuestos volátiles pueden perderse durante etapas de preparación de muestras. Esto implica que tanto los análisis químicos como los bioensayos toxicológicos realizados a partir de extractos concentrados representan únicamente una fracción del total de DBPs presentes en el agua tratada (34).

## CONCLUSIONES

El análisis de la revisión bibliográfica comparativa evidencia que, aunque la ozonización es más eficaz en la eliminación de microorganismos y en la reducción de compuestos orgánicos, su principal desventaja es la potencial creación de subproductos como los bromatos. Mientras tanto, la cloración, aunque es un oxidante menos efectivo, posee una ventaja considerable al generar un efecto residual que asegura la protección contra microorganismos en el sistema de distribución, aunque esto implica el peligro de formar subproductos como los trihalometanos.

A pesar de los avances realizados en métodos de desinfección, el estudio revisado destaca que todavía hay obstáculos significativos para lograr un control eficaz tanto de la actividad microbiológica como de la creación de subproductos. Aunque la ozonización presenta beneficios en cuanto a su velocidad y poder oxidante; la cloración asegura la protección en la red, ninguna de estas tecnologías soluciona completamente estos problemas de manera independiente. Esto indica la urgencia de seguir explorando enfoques combinados y condiciones óptimas de operación que ayuden a reducir riesgos sin comprometer la efectividad del tratamiento, especialmente en situaciones donde la calidad del agua cruda muestra alta variabilidad.

En este contexto, se concluye que ningún sistema de desinfección, utilizado de manera individual, alcanza un balance ideal entre efectividad microbiana, control de subproductos y cumplimiento normativo. La ozonización, por sí sola, no garantiza seguridad en la red, mientras que la cloración, cuando se utiliza como el único método, eleva la posibilidad de generar sustancias que pueden ser perjudiciales.

Por lo tanto, los datos científicos apoyan que la estrategia más equilibrada y eficaz es la fusión de ambos métodos dentro de un marco de múltiples barreras. El uso de ozonización como tratamiento inicial, junto con una cloración regulada como desinfección posterior, permite mejorar la eficacia en la eliminación de microorganismos patógenos, disminuye la concentración de sustancias precursoras de subproductos y preserva una cantidad residual de desinfectante que garantice la pureza del agua en la red de distribución.

En general, el análisis comparativo nos ayuda a comprender que la selección entre cloración y ozonización no debe ser vista como un simple cambio, sino como una elección técnica fundamentada en las características del agua de entrada y los objetivos específicos del tratamiento. Factores como la cantidad de materia orgánica, bromuros y las condiciones del sistema de distribución afectan directamente el rendimiento de cada método y la creación de subproductos. Por esta razón, en lugar de favorecer un enfoque sobre el otro, es más conveniente desarrollar sistemas de tratamiento que sean versátiles, capaces de ajustarse a diversas situaciones operativas y asegurar, de manera continua, que se cumplan los estándares de calidad del agua potable.

En resumen, se determina que la conformidad con las regulaciones de calidad del agua potable no se basa solo en la elección del desinfectante, sino en la correcta combinación de tecnologías, el mantenimiento estricto de las condiciones de operación y el seguimiento constante de los subproductos que se producen. En este contexto, la implementación de enfoques de múltiples barreras se establece como la opción más efectiva para asegurar la salud pública del agua que se utiliza para el consumo humano.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Huacani Sucasaca Y, De la Cruz Huanca NR, Gutiérrez Mayta DJ, Quispe Tito GV. Efectos de la estrategia de cloración de agua en la calidad de vida. Rev Vive. 22 de enero de 2025;8(22):177-88. doi:10.33996/revistavive.v8i22.369

2. Naciones Unidas. Naciones Unidas. Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: edición especial. Nueva York: Naciones Unidas; 2023. 2023.
3. World Health Organization; United Nations Children's Fund. Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene: 2017 Update and SDG Baselines. Geneva: WHO / UNICEF; 2017.
4. U.S. Environmental Protection Agency. National Primary Drinking Water Regulations [Internet]. 2020. Report No. Disponible en: <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>
5. Wang L, Fang Z, Zhou X, Cheng K, Ren Y, Li C, et al. Health risk assessment via ingestion of disinfection by-products in drinking water. Vol. 15. 2025;15. doi:10.1038/s41598-024-84094-9
6. National Research Council. Drinking Water and Health [Internet]. Washington (DC): National Academies Press; 1980. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK234590/>
7. Nielsen A, Garcia, L, Silva KJS, Sabogal-Paz LP, Hincapié MM, Montoya LJ, et al. Chlorination for low-cost household water disinfection – A critical review and status in three Latin American countries. International Journal of Hygiene and Environmental Health. 2022;244:114004. doi:10.1016/j.ijheh.2022.114004
8. Zhou Q, Bian Z, Yang D, Fu L. Stability of Drinking Water Distribution Systems and Control of Disinfection By-Products. Toxics. 2023;11(7):606. doi:10.3390/toxics11070606
9. Shah M, Mazhar M, Ahmed S, Lew B, Khalil N. Recent Trends in Controlling the Disinfection By-Products Before their Formation in Drinking Water: A Review. 2024. p. 177-92. Report No. doi:10.1007/978-3-031-49047-7\_9
10. Ramírez F. Tratamiento de desinfección del agua potable. Madrid, España: Canal de Isabel II; 2005.
11. Cai Y, Zhao Y, Yadav A, Ji B, Kang P, Wei T. Ozone based inactivation and disinfection in the pandemic time and beyond: Taking forward what has been learned and best practice. Vol. 862. 2023;862:160711. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.160711
12. Shahid M, Kashif A, Fuwad A, Choi Y. Current advances in treatment technologies for removal of emerging contaminants from water – A critical review. Coordination Chemistry Reviews. 2021;442:213993. doi:10.1016/j.ccr.2021.213993
13. Gonzales Saenz W, Acharte Lume LM, Poma Palacios JC, Sánchez Araujo VG, Quispe Coica FA, Meseguer Pallares R. Evaluación fisicoquímica y microbiológica del agua de consumo humano en seis comunidades rurales altoandinas de Huancavelica-Perú. Rev Investig Altoandinas. 2023;25(1):23-31. doi:10.18271/ria.2023.486
14. Cheswick R, Moore G, Nocker A, Hassard F, Jefferson B, Jarvis P. Chlorine disinfection of drinking water assessed by flow cytometry: new insights. Environmental Technology & Innovation. 19:101032. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101032>
15. Ocampo-Rodríguez DB, Vázquez-Rodríguez GA, Martínez-Hernández S, Iturbe-Acosta U, Coronel-Olivares C. Desinfección del agua: una revisión a los tratamientos convencionales y avanzados con cloro y ácido peracético. Ingeniería del Agua. 2022;26(3):185-204. doi:<https://doi.org/10.4995/ia.2022.17651>
16. Kong J, Lu Y, Ren Y, Chen Z. The virus removal in UV irradiation, ozonation and chlorination. Water Cycle. 2021;2:23-31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2021.05.001>

17. Saguti F, Kjellberg I, Churqui M, Wang H, Tunovic T, Ottoson J, et al. The Virucidal Effect of the Chlorination of Water at the Initial Phase of Disinfection May Be Underestimated If Contact Time Calculations Are Used. *Pathogens*. 2023;12(10):1216. doi:10.3390/pathogens12101216
18. Gregov M, Gajdoš Ključić J, Valinger D, Benković M, Jurina T, Jurinjaki A, et al. Optimization of Ozonation in Drinking Water Production at Lake Butoniga. *Water*. 2025;17(1):97. doi:https://doi.org/10.3390/w17010097
19. Botondi R, Barone M, Grasso C. Revisión de la eficacia de la tecnología del ozono para mejorar la seguridad y preservar la calidad de las frutas y verduras frescas cortadas. *Foods*. 2021;10(4):748. doi:10.3390/foods10040748
20. Morrison C, Hogard S, Pearce R, Gerrity D, von Gunten U, Wert E. Ozone disinfection of waterborne pathogens and their surrogates: A critical review. *Water Research*. 2022;214:118206. doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118206
21. Costa LR de C, Li L, Haak L, Teel L, Feris LA, Marchand E, et al. Optimizing ozone treatment for pathogen removal and disinfection by-product control for potable reuse at pilot-scale. *Chemosphere*. 2024;364:143128. doi:10.1016/j.chemosphere.2024.143128
22. Dowdell KS, Olsen K, Martinez Paz EF, Sun A, Keown J, Lahr R, et al. Assessing the effectiveness of near real-time flow cytometry in monitoring ozone disinfection in a full-scale drinking water treatment plant. *medRxiv*. 2023. doi:10.1101/2023.12.29.23300640
23. Zimoch I, Włodarczyk-Makuła M, Natonek J. Ozone-based pipeline disinfection in Water Supply Systems: A pilot study on secondary microbiological risk reduction. *Desalination and Water Treatment*. 2025;324:101447. doi:10.1016/j.dwt.2025.101447
24. Cheshmekhezer S, Alimoradi S, Torabian A, Pardakhti A, Babaei L. Investigation of the formation and effects of upstream trihalomethanes in Tehran's raw and drinking water using the spectrophotometric method. *Journal of Water Process Engineering*. 2021;44:102426. doi:10.1016/j.jwpe.2021.102426
25. Rasheduzzaman M, O'Connell B, Krometis LA, Brown T, Cohen A. Point-of-use chlorine residuals and disinfection byproduct occurrences in rural households served by public water utilities in Appalachian Virginia. *Journal of Water and Health*. 2024;22(6):1064-74. doi:10.2166/wh.2024.054
26. Hernández B, Duque-Sarango P, Tonón MD, Abril-González M, Pinos-Vélez V, García-Sánchez CR, et al. Determination of the Occurrence of Trihalomethanes in the Drinking Water Supply of the City of Cuenca, Ecuador. *Water*. 2025;17(4):591. doi:10.3390/w17040591
27. Zhang X, Yang H, Liu C, Wang X, Xie YF. Effects of heating temperature and water age on the formation of disinfection by-products in drinking water. *Yuefeng F*. 2025;11:1285-95. doi:10.1039/D4EW01068J
28. Oliveira KLA de, Bousada GM, Cerceau CI, Oliveira AF de, Moreira RPL. Efficient trihalomethane quantification in drinking water for minimally-equipped water treatment plants labs. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2024;321:124739. doi:10.1016/j.saa.2024.124739

29. Andersson A, Harir M, Bastviken D. Extending the potential of Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry for the analysis of disinfection by-products. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2023;167:117264. doi:10.1016/j.trac.2023.117264
30. Qodafi M, Rosmalina RT, Pitoi MM, Wulan DR. Chlorination disinfection by-products in Southeast Asia: A review on potential precursor, formation, toxicity assessment, and removal technologies. *Chemosphere*. 2023;316:137817. doi:10.1016/j.chemosphere.2023.137817
31. Elsharkawy K, Liu C. Effect of oxidative treatment on the formation of disinfection byproducts from tire wear particles upon water chlorination. *Environmental Pollution*. 2026;388:127375. doi:10.1016/j.envpol.2025.127375
32. Pichler R, Proulx F, Behmel S, Sérodès JB, Rodriguez MJ. Trends in Ozonation Disinfection By-Products—Occurrence, Analysis and Toxicity of Carboxylic Acids. *Water*. 2020;12(3):756. doi:10.3390/w12030756
33. Chiang PC, Chang EE, Chung CC, Liang CH, Huang CP. Evaluating and elucidating the formation of nitrogen-contained disinfection by-products during pre-ozonation and chlorination. *Chemosphere*. 2010;2010(3):327-33. doi:10.1016/j.chemosphere.2010.03.053
34. Elsharkawy K, Liu Y, Amy G, Liu C. Sample enrichment of drinking water for biological analyses of disinfection byproducts-associated toxicity: Recent advances. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2024;179:117892. doi:10.1016/j.trac.2024.117892