

**ESTUDIO DE LOS MÉTODOS DE DESINFECCIÓN ALTERNATIVOS
A LA CLORACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE
MICROORGANISMOS PATÓGENOS EN EL TRATAMIENTO DE
AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

ANA GABRIELA VEJAR GEREDA

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PAMPLONA, Junio 10 de 2020

**ESTUDIO DE LOS MÉTODOS DE DESINFECCIÓN ALTERNATIVOS
A LA CLORACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE
MICROORGANISMOS PATÓGENOS EN EL TRATAMIENTO DE
AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

ANA GABRIELA VEJAR GEREDA

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de
INGENIERA QUÍMICA**

Director: JACQUELINE CORREDOR

Dra, MSc, Ingeniera Química

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Pamplona, junio 10 de 2020

Dedicatoria

A mi madre, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias por ser mi motivación y mi mayor apoyo.

Agradecimientos

A Dios por guiarme y brindarme sabiduría a lo largo de la vida, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

A mi madre Rosaura Gereda Velandia por ser la principal promotora de mis sueños, por confiar y creer en mis capacidades, por los consejos, valores y principios que me ha inculcado.

A la Universidad de Pamplona y a los docentes del programa de Ingeniería Química, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión y por ultimo a la Doctora Jaqueline Corredor Acuña, por orientarme en la elaboración de la presente monografía.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN	13
3. OBJETIVOS	14
3.1 OBJETIVO GENERAL	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4. DESINFECCION EN EL TRATAMIENTO DE AGUA COMO MÉTODO PARA ASEGURAR LA CALIDAD SANITARIA.....	15
4.1 CLORACIÓN, MÉTODO DE DESINFECCIÓN CONVENCIONAL EMPLEADO PARA MEJORAR LA CALIDAD MICROBIANA EN EL AGUA DE CONSUMO.....	15
4.1.1 Aplicación de cloro en el tratamiento de agua para consumo.	15
4.1.2 Ventajas y limitaciones de la desinfección por cloración.	18
4.1.3 Efectos colaterales del método de cloración.	19
4.2 MÉTODOS DE DESINFECCIÓN ALTERNATIVOS A LA CLORACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE MICROORGANISMOS PATÓGENOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA.....	20
4.2.1 Métodos químicos de desinfección.....	22
4.2.1.1 Desinfección con ozono.....	23
4.2.1.2 Desinfección con bromo	24
4.2.1.3 Desinfección con yodo.....	25
4.2.1.4 Desinfección con plata.....	26
4.2.1.5 Desinfección con permanganato de potasio	27
4.2.1.6 Desinfección con ácido peracético	28
4.2.1.7 Desinfección con peróxido de hidrogeno.....	29
4.2.2 Métodos físicos de desinfección.....	30
4.2.2.1 Desinfección solar.....	30
4.2.2.2 Desinfección ultravioleta.....	31

4.2.2.3	Desinfección por minifiltración.....	32
4.3	VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL AGUA, PRODUCTO DEL MÉTODO DE DESINFECCIÓN EMPLEADO PARA MEJORAR LA CALIDAD MICROBIANA.....	34
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	37
6.	CONCLUSIONES	42
7.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	44
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
9.	ANEXOS.....	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Potencial estándar de óxido reducción para algunas sustancias usadas comúnmente en el aseguramiento de la calidad microbiológica del agua.	22
Tabla 2. Ventajas y limitaciones de la aplicación de ozono en el agua como agente desinfectante.	23
Tabla 3. Ventajas y limitaciones de la aplicación de bromo en el agua como agente desinfectante.	24
Tabla 4. Ventajas y limitaciones de la aplicación de yodo en el agua como agente desinfectante.	25
Tabla 5. Ventajas y limitaciones de la aplicación de plata en el agua como agente desinfectante.	26
Tabla 6. Ventajas y limitaciones de la aplicación de permanganato de potasio en el agua como agente desinfectante.	27
Tabla 7. Ventajas y limitaciones de la aplicación de ácido peracético en el agua como agente desinfectante.	28
Tabla 8. Ventajas y limitaciones de la aplicación de peróxido de hidrogeno en el agua como agente desinfectante.	29
Tabla 9. Ventajas y limitaciones de la aplicación de SODIS en el agua.	31
Tabla 10. Ventajas y limitaciones de la aplicación de luz ultravioleta en el agua.	32
Tabla 11. características de los métodos de minifiltración.	33
Tabla 12. Ventajas y limitaciones de la aplicación de los métodos de minifiltración en el agua.	33
Tabla 13. Influencia del método de desinfección en algunos parámetros fisicoquímicos.	35
Tabla 14. Efectividad del método frente a los microorganismos.	37
Tabla 15. Parámetros prácticos y económicos de los métodos de desinfección estudiados. ..	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama del comportamiento del cloro respecto a la cantidad adicionada al agua en el proceso de desinfección.....	16
Figura 2. Variación de la cantidad de cloro residual en función del cloro añadido para un caso hipotético.	17
Figura 3. Ventajas de la cloración como método para la desinfección del agua.	18
Figura 4. Clasificación de los métodos de desinfección.	21

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Criterios de calidad para el agua potable.....	51
---	----

GLOSARIO

Agente esterilizante: Son aquellos que producen la inactivación total de todas las formas de vida microbiana.

Agente oxidante: Si un reactivo en una reacción contribuye con oxígeno, extrae hidrógeno, o extrae electrones, se dice que es un agente oxidante.

Agente químico: Un agente químico es cualquier elemento o compuesto químico, por sí solo o mezclado.

Agua contaminada: Es el agua que sufre cualquier cambio químico, físico o biológico en la calidad, y que puede causar efectos negativos a cualquier cosa viva que consuma esa agua.

Agua potable: Es el agua apta para consumo humano, es decir, puede beberse directamente o usarse para lavar y/o preparar alimentos sin riesgo alguno para la salud.

Agua residual: Son todas aquellas aguas que han sido usadas en los entornos domésticos y urbanos, en las industrias y ganaderías, así como las aguas naturales que, por accidente o mala praxis, se hayan mezclado con las anteriores.

Alguicida: Sustancia que elimina las algas o impide su desarrollo.

Calidad microbiológica: Define la aceptabilidad de un producto, basada en la ausencia o presencia, o en la cantidad de microorganismos, incluidos parásitos.

Carcinógeno: Que produce cáncer o favorece su aparición.

Cloración: Tratamiento con cloro de las aguas para hacerlas potables o para mejorar sus condiciones higiénicas.

Desinfección: Eliminación de los gérmenes que infectan o que pueden provocar una infección en un cuerpo o un lugar.

Desinfectante: Sustancia que se emplea para destruir los microorganismos o inhibir su desarrollo.

Materia orgánica: Materia formada por una serie de sustancias químicas donde se advierte la presencia de carbono y en algunos casos, oxígeno, nitrógeno o fósforo.

Microorganismo: Son organismos de tamaño muy pequeño, que solo se pueden apreciar con la ayuda de un microscopio.

Mutagénico: Es un agente físico, químico o biológico que altera o cambia la información genética (usualmente ADN) de un organismo y ello incrementa la frecuencia de mutaciones por encima del nivel natural.

Patógeno: Son agentes infecciosos que pueden provocar enfermedades a su huésped, perturbando la fisiología normal de plantas, animales y humanos.

Saneamiento: Por saneamiento se entiende el suministro de instalaciones y servicios que permiten eliminar sin riesgo la orina y las heces.

Tóxico: Que es venenoso o que puede causar trastornos o la muerte a consecuencia de las lesiones debidas a un efecto químico.

Trihalometano: Son compuestos orgánicos volátiles fruto de la reacción de la materia orgánica que transporta el agua sin tratar, con el cloro que se emplea en la planta potabilizadora para su desinfección.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los seres humanos se encuentran expuestos a una crisis mundial por agua, esto se debe a que la mayoría de los recursos hídricos del planeta se encuentran sujetos a altos niveles de contaminación, a consecuencias de la sobreexplotación de los recursos naturales, al crecimiento del consumo debido a la natalidad desmedida y al deterioro medioambiental (Molina & Morales, 2018). Las diferentes actividades realizadas por el hombre han llevado a la variación de las propiedades de los recursos hídricos, llegando a niveles de contaminación que hacen al agua no apta para consumo humano, debido a esto los procesos para tratar el agua son cada vez más complicados y costosos. El agua potable debe estar libre de microorganismos patógenos, sustancias tóxicas o nocivas para la salud, y cumplir con las normas bacteriológicas y fisicoquímicas establecidas (Chulluncuy, Camacho, 2011). Consumir agua en malas condiciones puede conllevar a dificultades en la salud, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) existen por lo menos 25 enfermedades que pueden ser provocadas por la contaminación del recurso hídrico, en el caso de Colombia, las enfermedades más comunes por esta causa son hepatitis A, fiebre tifoidea/paratifoidea y enfermedad diarreica aguda, entre otros (Jiménez, 2015). Por ello la importancia de implementar en los sistemas de recursos hídricos prácticas adecuadas basadas en la salud, como la gestión de la calidad del agua asegurando la protección de la fuente, así como el tratamiento y la distribución del agua potable (Organización de Naciones Unidas [ONU] 2015).

El tratamiento del agua se compone de varias etapas, captación, coagulación, floculación, decantación, filtración y desinfección, esta última garantiza la calidad bacteriológica, eliminando microorganismos patógenos y otras formas de vida potencialmente peligrosas para la salud humana (Vargas, 1998). Por ello en este documento se identificaron los métodos de desinfección alternativos al convencional (cloración) que garantizaran la calidad sanitaria del agua, por lo tanto, se estudió la literatura que engloba esta temática y a partir de dicho estudio se propuso un método de desinfección más favorable desde el punto de vista, sanitario, económico y práctico como reemplazo de la cloración, esto se llevó a cabo identificando y describiendo los métodos de desinfección alternativos con el fin de determinar ventajas y desventajas y comparar los cambios en las propiedades fisicoquímicas del agua, producto del método de desinfección empleado para asegurar la calidad microbiana.

2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN

Actualmente el desinfectante más común en las plantas de tratamiento de agua es el cloro y sus derivados, este desinfectante ha sido catalogado como el agente químico aplicado al beneficio de la salud humana que ha logrado salvar millones de vidas durante el pasado siglo (Deininger, Skadsen, Sanford, & Myers, 1998). Sin embargo, estudios han expuesto posibles efectos secundarios y colaterales generando incertidumbre sobre su idoneidad en la participación del tratamiento de agua (Ishaq, Afsheen, & Khan, 2018).

Entre los efectos secundarios más comunes de la cloración se encuentran los malos sabores y olores en el agua por mala dosificación; por otro lado, los peligros para la salud que se asocian al cloro no solo se limitan a su naturaleza volátil, es de gran preocupación la formación de subproductos y compuestos oxidados incompletos presentes en el agua clorada que pueden aumentar su toxicidad. Los subproductos más comunes de la cloración son los cloroorgánicos y los trihalometanos (THM), en estudios se ha identificado que algunas de estas sustancias son mutagénicas, tóxicas o cancerígenas, estas son producto de la reacción del cloro con ácidos húmicos y fúlvicos que generalmente se encuentran en el agua. Una de las sustancias formadas es el THM halogenado con átomos de cloro que es conocido comúnmente como cloroformo, es un carcinógeno animal, el cual según la USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) conduciría a complicaciones en la salud si se llegará a consumir en el agua en concentraciones superiores a 0,10 mg/L (Khayyat, 2000).

La importancia de identificar un método de desinfección alternativo a la cloración nació a partir de los posibles efectos negativos que pueden presentarse por la aplicación de cloro como desinfectante en el tratamiento de aguas, debido a estos efectos los responsables de los suministros de agua potable se han visto obligados a buscar nuevas alternativas a la cloración como otros tratamientos químicos o físicos (Romero, 2008).

Cabe destacar que algunos de estos métodos presentan ciertas ventajas sobre la cloración, como el caso de los métodos de radiación (físico), ya que la aplicación de estos métodos elimina la problemática de las interacciones de agentes químicos con el material de las tuberías, no se forman subproductos y se puede lograr la misma inactivación microbiológica (Ishaq, Afsheen, & Khan, 2018). Otros agentes químicos ofrecen mayor poder oxidante, tiempos de reacción cortos, eliminando microorganismos y materia orgánica, sin producirse cambios de color, sabor y formación de productos tóxicos (Lenntech, 2012).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar métodos de desinfección alternativos a la cloración para la eliminación de microorganismos patógenos en el tratamiento de agua.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Describir métodos alternativos a la cloración para el aseguramiento de la calidad microbiológica del agua.
- ❖ Determinar ventajas y desventajas del método convencional de desinfección frente a las diferentes alternativas de eliminación de microorganismos patógenos.
- ❖ Comparar los cambios en las propiedades fisicoquímicas del agua, producto de utilizar las técnicas alternativas para mejorar la calidad microbiana de la misma.
- ❖ Analizar la literatura para proponer el método de desinfección más favorable desde el punto de vista, sanitario, económico y práctico como reemplazo de la cloración.

4. DESINFECCION EN EL TRATAMIENTO DE AGUA COMO MÉTODO PARA ASEGURAR LA CALIDAD SANITARIA

La desinfección es una etapa fundamental en el tratamiento del agua potable para eliminar los patógenos nocivos y prevenir las enfermedades transmitidas por el consumo de agua de baja calidad microbiana (Liu et al., 2020). Tradicionalmente, los procesos de desinfección se han llevado a cabo con el objetivo de destruir o inactivar organismos patógenos de origen fecal, pero su uso no compromete obligatoriamente la eliminación completa (esterilización) de todos los organismos vivos (Scarpino, Lucas, Dahling, Berg, & Chang, 1974).

4.1 CLORACIÓN, MÉTODO DE DESINFECCIÓN CONVENCIONAL EMPLEADO PARA MEJORAR LA CALIDAD MICROBIANA EN EL AGUA DE CONSUMO

El uso del cloro como agente desinfectante empezó a principios del siglo XX, en la actualidad se ha popularizado, siendo este el desinfectante más común en el tratamiento del agua potable ya que ha mejorado enormemente su calidad microbiológica (Jia et al., 2020). El cloro tiene una gran capacidad de oxidación que ataca a los ácidos nucleicos microbianos hasta destruirlos y perjudica a la membrana celular. Su manipulación es relativamente fácil y los costos relacionados a la inversión del proceso son bajos (Anastasi, Wohlsen, Stratton, & Katouli, 2013), lo que lo hace atractivo para seguir siendo el método de desinfección más utilizado.

4.1.1 Aplicación de cloro en el tratamiento de agua para consumo.

El cloro en el agua es un agente químico muy activo, si se adiciona una cantidad pequeña de cloro al agua, este reaccionara con la multitud de sustancias que se encuentran disueltas o suspendidas en ella, al reaccionar con estas sustancias su poder desinfectante quedara anulado ya que este se transformara en compuestos de cloro que no tienen la capacidad de eliminar microorganismos patógenos, por esto la cantidad adicionada de cloro en el tratamiento de agua es clave para una eliminación microbiana adecuada, asegurando la calidad del agua tratada (F. R. Quirós, 2005). Esto se puede apreciar en la figura 1, en ese diagrama se explican los posibles comportamientos del cloro respecto a la cantidad adicionada en la desinfección del agua.

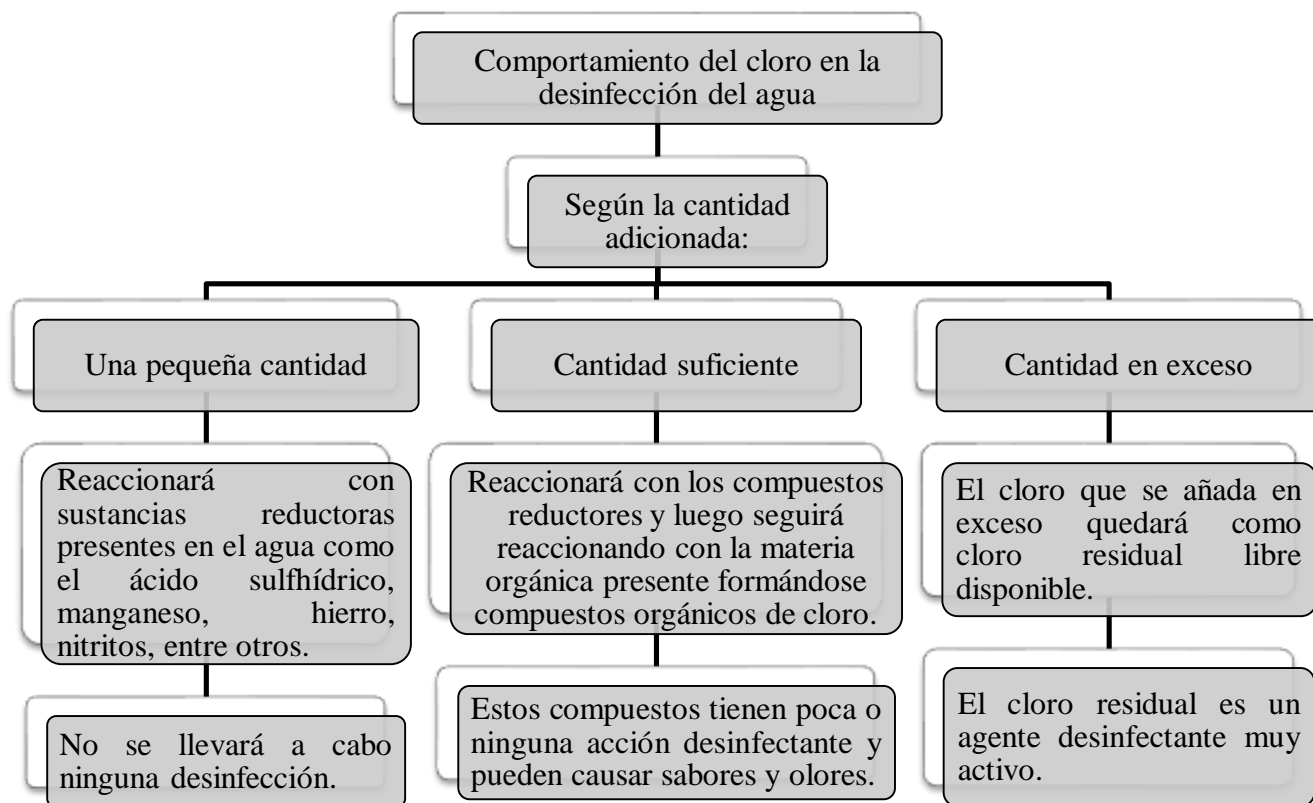


Figura 1. Diagrama del comportamiento del cloro respecto a la cantidad adicionada al agua en el proceso de desinfección.

Fuente: información tomada de Asociación Española de Abastecimientos de agua y saneamiento (2000).

El cloro residual libre es la cantidad en exceso añadida de cloro en el tratamiento del agua y es la encargada de eliminar los microorganismos patógenos de la misma, la concentración de cloro residual en aguas potables debe estar entre 0.5 y 1 ppm (Reyes & Nicasio, 2016). El cloro libre residual puede presentarse en forma de Cl_2 , HClO y/o ClO^- , dependiendo del pH de trabajo y por lo tanto corresponde a la suma de estas tres especies (Innovación tecnológica catalana [ITC] 2006).

Del diagrama de la figura 1 se puede deducir que el cloro además de reaccionar con los microorganismos también lo hace con material inorgánico y orgánico presente en el agua, por esta razón para disponer de algún nivel de cloro residual, la cantidad precisa que se debe añadir debe ser superior a la demanda de cloro, es decir la cantidad de cloro que se consume hasta que surge el residual, esta cantidad se determina con el método “break point” (Ramírez & Durán, n.d.), en español punto de ruptura, éste se ilustra en la figura 2, en la que se muestra la variación del cloro residual conforme se añade cloro en el tratamiento de agua de un caso hipotético.

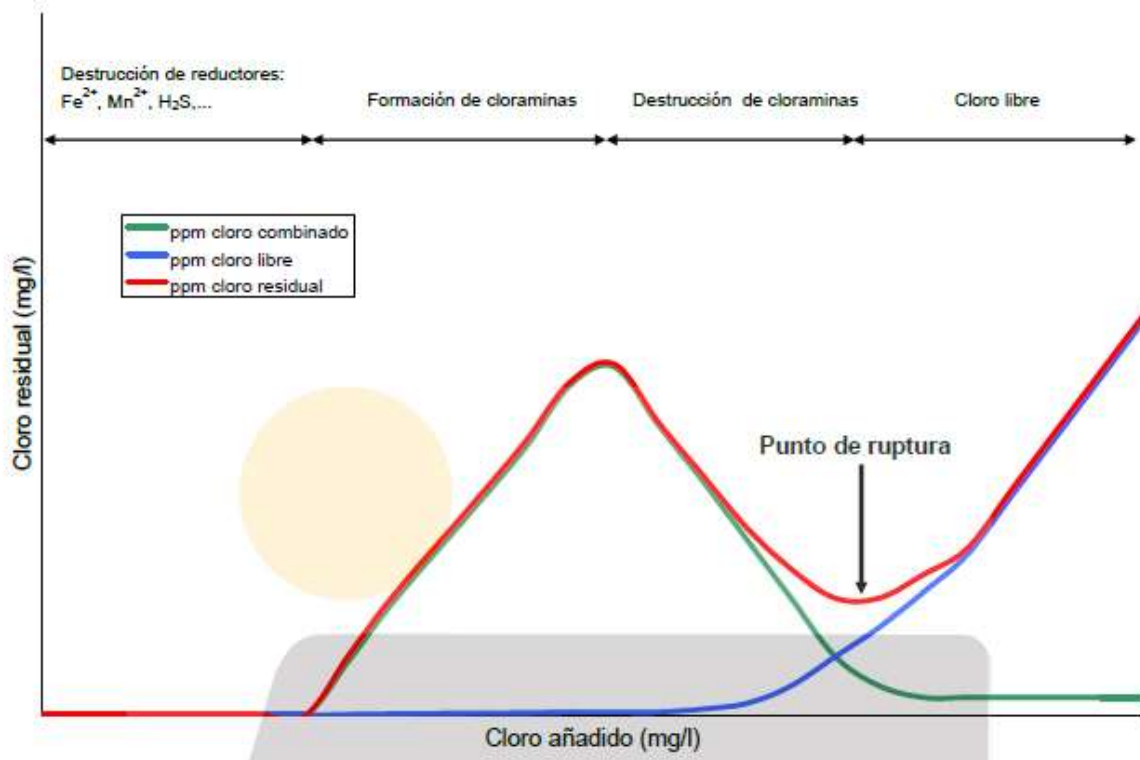


Figura 2. Variación de la cantidad de cloro residual en función del cloro añadido para un caso hipotético.

Fuente: (Innovación tecnológica catalana [ITC] 2006).

En la figura 2 se puede identificar al cloro residual como una línea de color rojo, la que inicialmente se encuentra en un valor de 0 ya que en esta etapa el cloro añadido oxida a las sustancias reductoras presentes en el agua, después de eliminadas estas sustancias inicia la formación de compuestos clorados (cloraminas principalmente), estos otorgan carácter desinfectante pero no lo suficiente para mejorar la calidad microbiana del sistema. Se sigue adicionando cloro hasta que haya reaccionado todo el amoníaco y las aminas, es allí cuando el cloro residual alcanza un punto máximo, después de este inicia la etapa de destrucción de compuestos clorados formados anteriormente, la cantidad de cloro residual empieza a decrecer esto se debe a que se consume tanto el cloro residual, como el cloro añadido, a su vez también disminuye la capacidad desinfectante del sistema, esto se da hasta que se alcanza el punto de ruptura, el que se presenta cuando toda la materia orgánica oxidable ha sido eliminada y todo el cloro añadido empieza a mantenerse como cloro libre, en este punto el agua ya tiene cierto valor de cloro residual. Como la mayor parte de los compuestos que se han ido formando desprenden malos olores, el punto de ruptura, es la dosis que corresponde al mínimo sabor a cloro del agua, a partir del cual se empiezan a cumplir las garantías higiénicas (Medeiros & Daniel, 2017). La demanda de cloro es la diferencia que existe entre la cantidad de cloro

aplicada al agua y la de cloro disponible libre. Así pues, se puede considerar que la demanda de cloro aproximadamente coincide con la dosis a la que se alcanza el punto de ruptura.

4.1.2 Ventajas y limitaciones de la desinfección por cloración.

En todos los procesos es importante conocer las ventajas y limitaciones que representa ejecutar dicho proceso, en la figura 3 se resumen mediante un diagrama los pros y los contras de la cloración como método para asegurar la calidad microbiológica en el agua para consumo humano.

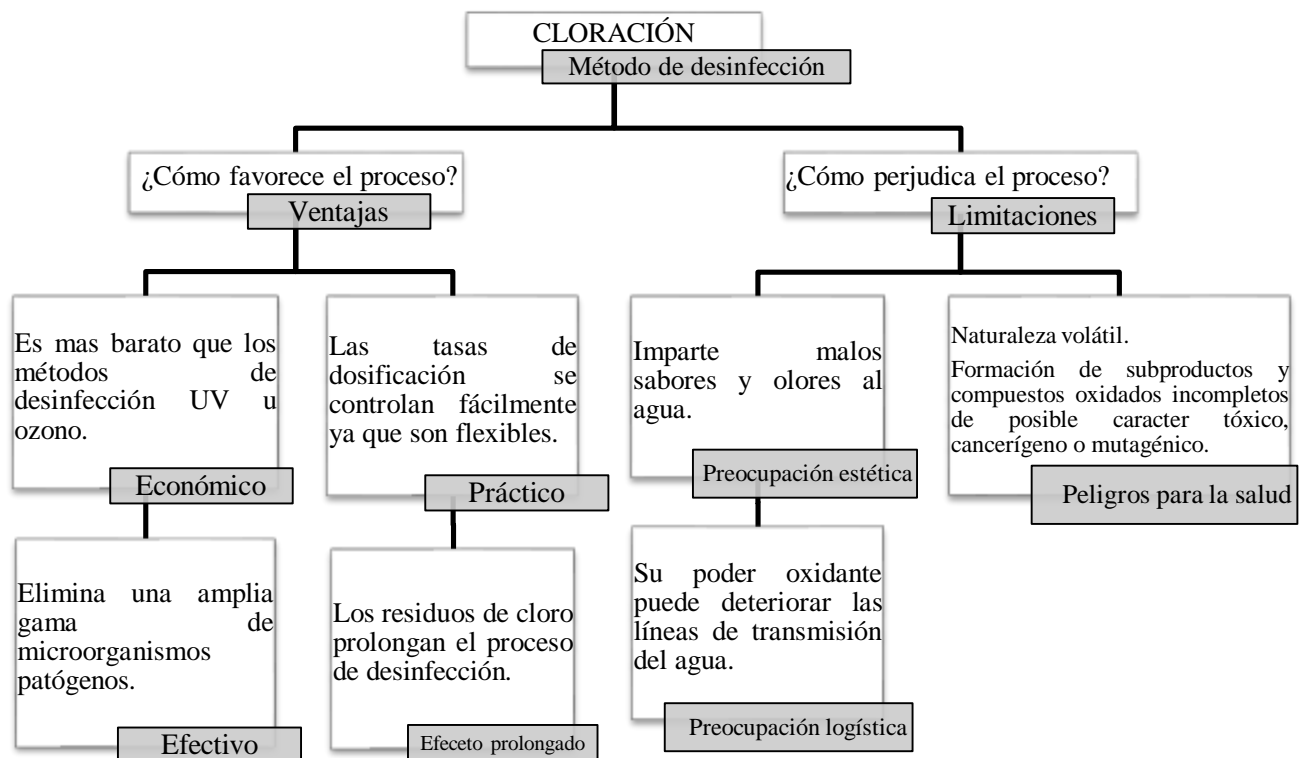


Figura 3. Ventajas de la cloración como método para la desinfección del agua.

Fuente: Información tomada de Muñoz (2019).

Entre las ventajas se destacan su alto carácter oxidativo, su poder residual, la sencillez de dosificación y los costos asequibles, por estas características es ampliamente utilizado como desinfectante de agua (Ishaq, Afsheen, & Khan, 2018).

Algunas limitaciones están asociadas a su naturaleza como, su volatilidad y su poder oxidante, el cual puede deteriorar las líneas de suministro, por estas razones, el manejo de cloro se ha de realizar por parte de personal especializado y son necesarios los sistemas de control y de alarma muy efectivos (Brinsa, 2018).

4.1.3 Efectos colaterales del método de cloración.

Las propiedades desinfectantes del cloro se conocen desde hace siglos, no hay duda de que ha sido uno de los mayores avances en la purificación del agua. Sin embargo, en los últimos años se han presentado algunas críticas, debido a sus efectos colaterales como la formación de subproductos, principalmente trihalometanos (THMs), ya que consumir estas sustancias conllevaría a riesgos en la salud debido a su naturaleza cancerígena (Sallés, 2010).

Estos compuestos organoclorados se forman cuando el cloro añadido reacciona con sustancias húmicas y fúlvicas comunes en el agua cruda, este riesgo potencial de formación de THMs se ve afectado por los cambios de temperatura, pH, el tipo de fuente, la concentración de las sustancias precursoras de la reacción, la dosis de cloro, los niveles de yoduro y bromuro, así como el tiempo de reacción. Los THMs además de formarse en el proceso de desinfección del agua pueden continuar formándose en el sistema de distribución del agua potable, donde a causa del descenso de la velocidad y los grandes volúmenes manejados, se aumenta el tiempo de residencia y contacto entre la materia orgánica que pudo quedar después del tratamiento y el cloro residual presente. Estudios realizados han demostrado que la formación de trihalometanos también está regida por las condiciones climatológicas de la zona, puesto que en épocas de verano o sequía existe menor arrastre de materia orgánica, arena, restos de vegetación, etc., incrementando el riesgo de formación de THMs (Bracho, Castillo, Vargas, & Morales, 2009).

La preocupación emergente sobre los riesgos para la salud asociados a los THMs ha promovido que muchos países establezcan valores máximos para estos contaminantes. En efecto, la USEPA establece un nivel de 80 µg/L de THMs totales. La Unión Europea y el Ministerio de la Protección Social en Colombia una concentración máxima de 200 µg/L. De la misma forma, la OMS ha establecido concentraciones máximas de referencia para las cuatro especies de THMs más frecuentes, cloroformo, bromodiclorometano, dibromoclorometano y bromoformo en 300, 60, 100 y 100 µg/L, respectivamente, y aunque no se ha definido para el total de THMs se recomienda que los valores de estos en el agua de consumo humano se mantengan tan bajos como sea posible, siempre y cuando se asegure una desinfección eficaz. (Vallejo-Vargas et al., 2015, p.2)

Uno de los THMs que se puede presentar en mayor proporción en el agua tratada con cloro es el cloroformo (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2006), un compuesto químico también conocido como triclorometano o tricloruro de metilo. Es un líquido incoloro con un olor agradable y no irritante, con característica de tener un sabor dulzón (Carl Roth GmbH, 2017). El cloroformo se encuentra clasificado como una de las sustancias posiblemente

cancerígenas para el ser humano (Grupo 2B), basándose en la escasez de pruebas de su capacidad cancerígena en el ser humano y en la existencia de pruebas suficientes de su capacidad cancerígena en animales de experimentación (estudios con roedores). Los efectos tóxicos del cloroformo observados con mayor frecuencia por inhalación de aire o por ingerir líquidos con gran contenido de cloroformo son: Lesiones en riñones, lesiones en la región centrolobulillar del hígado (López Jiménez, 2016) y afecciones al sistema nervioso central (el cerebro). Se evidenció cáncer de hígado y de riñones en los animales de experimentación que consumieron agua con cloroformo en grandes cantidades durante tiempo prolongado y en el caso de los estudios en personas, los resultados arrojaron que aquellos que bebieron agua clorada mostraron un posible vínculo entre el cloroformo del agua y los casos de cáncer de colon y de vejiga (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [ATSDR], 2000).

4.2 MÉTODOS DE DESINFECCIÓN ALTERNATIVOS A LA CLORACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE MICROORGANISMOS PATÓGENOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

La desinfección es la última etapa del tratamiento del agua, cuya finalidad es asegurar la calidad microbiana de la misma y garantizar que sea inocua para la salud del consumidor. Aunque la práctica muestra que las etapas de coagulación, sedimentación y filtración eliminan la mayor cantidad de microorganismos patógenos del agua, su capacidad no alcanza al 100%. Adicionalmente, las aguas tratadas pueden experimentar recontaminación en los tanques de almacenamiento o en las redes de distribución antes de ser suministrada a la población, por esta razón es ideal que la desinfección pueda actuar en situaciones que afecten la calidad del agua posteriormente al tratamiento (Collivignarelli, Abbà, Benigna, Sorlini & Torretta, 2018).

Un método de desinfección oportuno debe tener en lo posible las siguientes cualidades: Alta capacidad biocida para amibas, bacterias y virus, carencia de subproductos tóxicos por acción del desinfectante en el agua, ausencia de propiedades potencialmente peligrosas para humanos y otras formas de vida, fácil de manejar y aplicar, así como bajos costos relacionados a la operación e inversión del mismo (Watson, Farré & Knight, 2012).

La desinfección puede llevarse a cabo mediante dos tipos de procedimiento: Empleando agentes químicos (desinfección química) o agentes no químicos (desinfección física) (Linares, Lucero, Velazquez, Jiménez, & Islas, 2018), en la figura 4 se muestra mediante un diagrama como se pueden clasificar los métodos de desinfección.

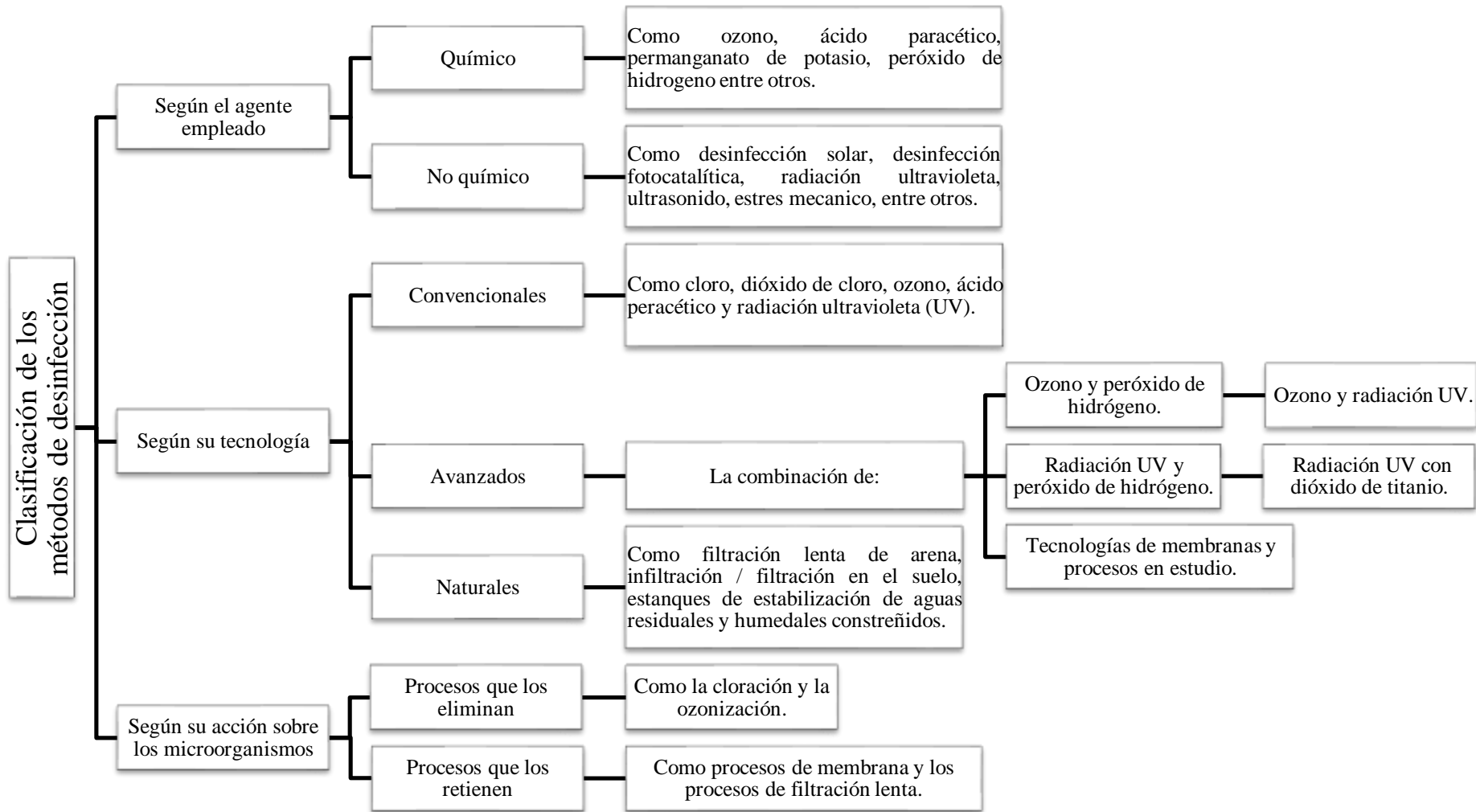


Figura 4. Clasificación de los métodos de desinfección.

Fuente: información tomada de Linares et al. (2018) y Collivignarelli et al. (2018).

Teniendo en cuenta lo planteado en el anterior diagrama, los métodos de desinfección se pueden clasificar en base a su tecnología, a su acción en la eliminación de los microorganismos y al agente desinfectante empleado, siendo esta última la clasificación que se abordó en este documento ya que las otras dos clasificaciones nacen a partir de esta.

4.2.1 Métodos químicos de desinfección.

Son aquellos métodos que involucran en su proceso una sustancia química como agente activo desinfectante. Estos compuestos se caracterizan por su potencial oxidativo, entre los que se encuentran el cloro, el ozono, el dióxido de cloro, el peróxido de hidrógeno, plata, cobre y otros compuestos como aldehídos. Estos métodos se destacan por ser rápidos y eficientes en la remoción de microorganismos, algunos de ellos ocasionan efectos residuales que propician la prevención de proliferaciones futuras de los microorganismos, adicionalmente los costos que se relacionan a su aplicación son relativamente bajos (Francy et al., 2012).

Los agentes químicos empleados en estos métodos se caracterizan por tener un alto carácter oxidativo, es importante conocer el potencial de óxido-reducción del agente ya que mientras más elevado sea éste, mayor será la capacidad de destruir la pared celular de los microorganismos, por lo tanto, más efectiva será la eliminación de los mismos (Linares et al., 2018). En la tabla 1 se presenta el potencial estándar de óxido-reducción para algunas sustancias usadas comúnmente en el aseguramiento de la calidad microbiológica del agua.

Tabla 1. Potencial estándar de óxido reducción para algunas sustancias usadas comúnmente en el aseguramiento de la calidad microbiológica del agua.

Fuente: (Linares et al., 2018)

Compuesto	Fórmula	Potencial de oxidación [volts]
Cloro	Cl ₂	1.36
Bromo	Br ₂	1.09
Yodo	I ₂	0.54
Ozono	O ₃	2.97
Dióxido de cloro	ClO ₂	0.95
Hipoclorito	ClO ⁻	1.48
Perclorato	ClO ₄ ⁻	1.39
Permanganato	MnO ₄ ⁻	1.68
Peróxido de hidrógeno	H ₂ O ₂	1.78
Ferrato (VI)	FeO ₄ ²⁻	2.20

En la tabla 1 se puede apreciar que, sustancias como el permanganato, el peróxido de hidrógeno, el ferrato y el ozono (en orden ascendente) presentan mayor potencial oxidativo que el cloro. A continuación, se describirán algunos métodos químicos (que no contengan cloro) alternativos a la cloración para la eliminación de microorganismos patógenos en el tratamiento de agua para consumo humano.

4.2.1.1 Desinfección con ozono.

El ozono es un gas incoloro, de olor fuerte, con alto poder oxidante, (Comisión Europea, 2009), es una fórmula alotrópica (inestable) del oxígeno en la que se combinan tres moléculas para producir una nueva molécula, ésta se descompone rápidamente para generar radicales libres altamente reactivos (Linares et al., 2018). El ozono se produce a partir de un gas que contiene oxígeno, éste debe estar seco y libre de impurezas (generalmente aire ambiente u oxígeno puro), este gas pasa a través de un campo eléctrico, convirtiéndose en ozono, el cual luego es alimentado al tanque de contacto para que se lleve a cabo la desinfección. (Jaimes & Vera, 2020). A continuación, en la tabla 2 se presentan algunas ventajas y limitaciones que representa la aplicación de la ozonización como método de desinfección.

Tabla 2. Ventajas y limitaciones de la aplicación de ozono en el agua como agente desinfectante.

Fuente: (Orbegoso & Quispe, 2014)

Ventajas	Limitaciones
Facilidad de producción desde aire u oxígeno por descargas eléctricas.	Es altamente corrosivo y tóxico ya que es un gas efecto de invernadero.
Facilidad de reacción con compuestos orgánicos e inorgánicos.	El ozono debe ser generado “in situ” por problemas en el almacenamiento y transporte, ya que la vida media en el sistema es de 25 minutos, puede descomponerse, reaccionar con impurezas o volatilizarse.
Es más efectivo que el cloro, las cloraminas y el dióxido de cloro para la inactivación de virus, como <i>Cryptosporidium</i> y <i>Giardia</i> .	
Reduce el color, olor, turbidez del agua tratada y el carbono orgánico total.	El costo inicial del equipamiento es alto, y los generadores requieren mucha energía.
Es uno de los desinfectantes más eficientes, requiere un tiempo de contacto pequeño.	Se requieren filtros activados para eliminar carbono orgánico biodegradable.
En ausencia de bromo, no se forman subproductos por desinfección (SPDs).	Se forman SPDs en presencia de bromo, aldehídos, cetonas, etc.

Entre las ventajas se destacan su poder bactericida y virulicida y además la capacidad de eliminar grandes cantidades de sustancias orgánicas o minerales no deseables. Por su alta solubilidad, generación confiable y sus robustas propiedades reactivas, la ozonización se

convierte en una técnica viable en el tratamiento de agua para consumo humano (Córdova, Gavilanes, Ruíz & Vega, 2018). Su aplicación ha permitido un notable mejoramiento del gusto, color, características de filtración y biodegradabilidad del agua, además, de inhibir el crecimiento de hongos y algas, y reducir la turbiedad

4.2.1.2 Desinfección con bromo

El bromo es un líquido rojo que se evapora y huele fácilmente, puede reaccionar con numerosas sustancias, es muy corrosivo y destructivo para el material orgánico. Por su reactividad es un potencial desinfectante, sin embargo, los estudios sobre el bromo como desinfectante del agua son escasos, debido a la preocupación sobre la formación de subproductos de desinfección (SPDs) (Jihoon, 2014).

Al ser líquido, el bromo se dosifica por medio de una bomba de diafragma o pistón y sus requerimientos operativos como las medidas de seguridad son semejantes a las usadas en la desinfección por cloración. Una vez disuelto el bromo en el agua se forma ácido hipobromoso (HOBr), éste actúa de manera similar al ácido hipocloroso (HOCl), penetrando las membranas de las células de los microorganismos, atacando dicha membrana por medio de reacciones con grupos sulfhidrilos, inactivando enzimas y deteniendo el proceso metabólico, lo que lleva a la muerte del microorganismo (Bevan, Nocker & Sobesy, 2018).

A continuación, en la tabla 3 se muestran algunas ventajas y limitaciones que representa la aplicación de bromo como método de desinfección.

Tabla 3. Ventajas y limitaciones de la aplicación de bromo en el agua como agente desinfectante.

Fuente: Información tomada de Jihoon (2014) y Bevan, et al. (2018).

Ventajas	Limitaciones
Al ser líquido es más sencillo de manipular y dosificar que el cloro.	Se vaporiza con facilidad y los gases son agresivos, se debe evitar su inhalación.
Es especialmente eficaz en presencia de amoníaco, como en las aguas residuales.	Es corrosivo y agresivo, por lo que su manejo requiere mucho cuidado.
Las bromaminas son mucho más eficaces que las cloraminas (cloro combinado).	Disponibilidad limitada, no se compara con la fácil adquisición del cloro.
El bromo es más biocida a pH más altos que el cloro.	Formación de SPD de carácter cancerígeno como el bromoformo.
El bromo se disuelve en agua tres veces mejor que el cloro.	Se estima que la bromación es cinco veces más cara que la cloración.

El bromo como agente desinfectante es más sencillo de manipular, más biocida y más soluble en el agua, sin embargo, su acceso es limitado y costoso, en comparación con el cloro.

4.2.1.3 Desinfección con yodo

El yodo pertenece a la familia de los halógenos, a temperatura ambiente es sólido, tiene baja solubilidad en el agua y es la sustancia menos agresiva de su familia (Cl_2 y Br_2) (Agency Enviromental Protection, n.d.). Al igual que los otros halógenos esta sustancia produce SPD, sin embargo, debido a su menor potencial de oxidación y menor reactividad, ésta genera menos THM que los otros, por lo que la preocupación cuando se utiliza el yodo no está tanto en los SPD, sino en su misma acción ya que en el mundo se han registrado numerosos casos de reacciones alérgicas de personas hipersensibles al yodo (Rojas, Ruz, González, n.d.).

Una vez disuelto en el agua el yodo forma ácido hipoyodoso (HOI), dependiendo del pH una parte considerable permanece en el agua como I_2 o como ión hipoyodito, éste no posee características microbicidas relevantes, lo que hace que no sea un buen desinfectante como el I_2 y el HOI, ya que estos se caracterizan por ser buenos bactericidas y destruyen inclusive esporas, quistes y virus. El yodo puede ser adicionado al agua pasando una corriente de vapor a través de un manto de cristales de la sustancia y disolviendo luego el vapor en agua. Sin embargo, el método más recomendado es el de preparar una solución saturada pasando una corriente de agua por un lecho también de cristales de yodo y luego dosificarlos con una bomba de diafragma convencional (González, 2004).

A continuación, en la tabla 4 se muestran algunas ventajas y limitaciones que representa la aplicación de yodo como método de desinfección.

Tabla 4. Ventajas y limitaciones de la aplicación de yodo en el agua como agente desinfectante.

Fuente: Información tomada de Agency Enviromental Protection (n.d.), Rojas et al. (n.d.) y González (2004).

Ventajas	Limitaciones
Proceso sencillo al igual que la cloración.	10 a 20 veces más costoso que el cloro.
Eficaz en la eliminación de bacterias, virus, quistes de amebas, entre otros.	Disponibilidad limitada, no se compara con la fácil adquisición del cloro.
A diferencia del cloro su eficacia contra los virus aumenta al incrementarse el pH.	Puede ejercer efectos fisiológicos en personas sensibles a esta sustancia.
Efecto residual más estable que el cloro.	Es muy volátil en solución con agua.

El yodo como agente desinfectante es sencillo de manipular, es más eficiente en la remoción de virus y su efecto residual es más estable, sin embargo, su acceso es limitado y costoso, en comparación con el cloro.

4.2.1.4 Desinfección con plata

La plata solo tiene propiedades desinfectantes en su estado coloidal, esto es cuando se presenta en partículas extremadamente pequeñas que permanecen en suspensión y que por su tamaño se cargan eléctricamente con mucha facilidad, sin embargo, en forma coloidal no elimina a los virus, pero se considera de gran eficacia para destruir diversas bacterias (Cáceres, 2018).

El mecanismo de desinfección actúa por la inactivación de las enzimas de las células bacterianas y hongos que usan oxígeno para su metabolismo, pues causa una disrupción celular, ya que los iones de plata cargados positivamente forman compuestos electrostáticos con células de microorganismos que están cargados negativamente. Esto produce daño o interrupción en la permeabilidad de la pared celular y por lo tanto evita la toma de nutrientes, hasta la eliminación del microorganismo (Cáceres, 2018).

A continuación, en la tabla 5 se muestran algunas ventajas y limitaciones que representa la aplicación de plata como método de desinfección.

Tabla 5. Ventajas y limitaciones de la aplicación de plata en el agua como agente desinfectante.

Fuente: Información tomada de Cáceres (2018) y Martillo (2018).

Ventajas	Limitaciones
No produce sabor, olor ni color en el agua tratada a diferencia de la cloración.	Lentitud en las reacciones de eliminación de materia orgánica.
No hay formación de SPDs.	La plata no posee un buen poder residual.
Es oligodinámica, solo se necesitan pequeñas concentraciones para la inhibición de microorganismos,	Se estima que el costo de la desinfección con plata resulta 200 a 300 veces superior al costo de la cloración.
Es una metodología muy simple y fácil de manejar en las áreas rurales.	No es efectiva para eliminar virus. Requiere de un prolongado tiempo de contacto.
Las concentraciones empleadas en el tratamiento de agua no representan ningún peligro para la salud.	La dosificación es difícil de controlar por falta de un método simple de análisis de laboratorio.

La plata es uno de los metales que se caracteriza por presentar la propiedad llamada oligodinamia, tiene efecto o poder en pequeña cantidad. En el tratamiento de agua con plata no se producen sabores, olores ni colores anormales en el agua, tampoco hay formación de SPDs. Sin embargo, las reacciones son lentas, no es tan efectiva en la eliminación de virus, no posee poder residual y es hasta 300 veces más costoso que el método convencional.

4.2.1.5 Desinfección con permanganato de potasio

El permanganato de potasio se encuentra en forma sólida, como cristales pequeños o en polvo de color violeta, es bastante soluble en agua, el manejo, la preparación de soluciones y la dosificación es fácil. Adicionalmente el permanganato puede contribuir a la coagulación, ya que el MnO_2 resultante, forma coágulos que favorecen la coprecipitación de materias en suspensión y coloides en el agua. En aguas con alto contenido en materia orgánica se ha comprobado que cuando se usa el permanganato como desinfectante se mejora la coagulación, disminuyendo a su vez la turbidez (F. Quirós, 2005).

A continuación, en la tabla 6 se muestran algunas ventajas y limitaciones que representa la aplicación de permanganato de potasio como método de desinfección.

Tabla 6. Ventajas y limitaciones de la aplicación de permanganato de potasio en el agua como agente desinfectante.

Fuente: Información tomada de Weber (1979) y F. Quirós (2005).

Ventajas	Limitaciones
No produce sabor ni olor en el agua tratada a diferencia de la cloración.	La velocidad de destrucción de la <i>E.coli</i> es más baja, comparada con la cloración.
No hay formación de SPDs como en el método convencional.	Es más costoso que el cloro.
Elimina compuestos inorgánicos como hierro, manganeso y ácido sulfhídrico.	En su forma más pura podría ser toxico.
Es un fuerte oxidante reacciona fácilmente con la materia orgánica.	La eliminación de amoniacó (NH_3) es regular.

Se caracteriza por un alto poder oxidante y propiedades biocidas y alguicidas tiene la capacidad de eliminar hierro, manganeso, sulfhídrico, fenoles y otros compuestos orgánicos, su aplicación elimina sabores y olores, debido a que rompe las moléculas de las sustancias orgánicas causantes de dichos olores al quedar adsorbidas por el propio precipitado de dióxido de manganeso (MnO_2) formado en el proceso de oxidación-reducción. En este proceso no se forman trihalometanos, incluso se reduce los precursores de éstos (Weber, 1979). La dosificación del producto suele hacerse generalmente preparando previamente una solución o agregando al agua también en seco, mediante los dosificadores convencionales de materiales pulverulentos, la cantidad adicionada depende de la materia orgánica presente en el agua (F. Quirós, 2005).

4.2.1.6 Desinfección con ácido peracético

El ácido peracético ($C_2H_4O_3$) conocido como APA, es una mezcla de ácido acético y peróxido de hidrógeno en solución acuosa. es un líquido transparente sin capacidad espumante y con un fuerte olor característico a ácido acético, soluble en agua, alcohol, éter y ácido sulfúrico.

El APA ha venido siendo usado en Europa y Canadá por más de 30 años para desinfectar agua residual y aguas lluvias, y desde hace poco menos de una década, viene siendo acogido y estudiado por la USEPA como una alternativa “más verde” que podría reemplazar el cloro y sus derivados en la desinfección (Martin, 2014). A continuación, en la tabla 7 se presentan algunas ventajas y limitaciones que representa la aplicación de ácido peracético como método de desinfección.

Tabla 7. Ventajas y limitaciones de la aplicación de ácido peracético en el agua como agente desinfectante.

Fuente: Información tomada de Martin (2014), Rodríguez (2016), Burgos & Toro (2018) y Flores (2018).

Ventajas	Limitaciones
Es un agente antimicrobiano más potente que el hipoclorito, el dióxido de cloro y el peróxido de hidrogeno, pero no tan fuerte como el ozono.	La eficacia de la desinfección con APA disminuye con el aumento de sólidos suspendidos totales (SST) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
Facilidad de aplicación del tratamiento sin necesidad de equipos costosos.	
No afecta la toxicidad del efluente, por lo que no es necesario eliminarlo como en el caso del cloro.	La efectividad del APA disminuye a pH básico.
Es más estable que el cloro	
Ausencia de generación de subproductos indeseables para el medio ambiente.	Es menos efectivo para la inactivación de esporas, virus y protozoos, incluidos <i>Giardia</i> y <i>Cryptosporidium</i> .
Es más fácil y muchas veces más seguro de almacenar que los desinfectantes convencionales.	

Los atributos que hacen del ácido peracético un potencial desinfectante de aguas residuales son: La facilidad de aplicación del tratamiento (sin necesidad de costosas inversiones de capital), su alto poder oxidante, incluso en presencia de materia orgánica heterogénea, ausencia

de subproductos o residuos tóxicos o mutagénicos persistentes, baja dependencia con el pH, cortos tiempos de contacto y efectividad para efluentes primarios y secundarios (Burgos & Toro, 2018). Posee una rápida acción biocida frente a toda clase de microorganismos, esta actividad desinfectante radica en su capacidad oxidante sobre la membrana externa de las bacterias, esporas y levaduras (Rodríguez, 2016). El APA puede dañar virtualmente todo tipo de macromoléculas asociadas con un microorganismo: Carbohidratos, ácidos nucleicos (mutaciones), lípidos (peroxidación lipídica), y aminoácidos, esto lleva de manera final a la lisis celular y una verdadera muerte microbiana (Flores, 2014).

4.2.1.7 Desinfección con peróxido de hidrogeno.

El peróxido de hidrógeno también conocido como agua oxigenada, dioxogen o dioxidano, es un líquido altamente polar, incoloro, bastante estable, es soluble en agua y en éter e insoluble en éter de petróleo. Es conocido por su poder oxidante, ya que es una excelente fuente de oxígeno con radicales superóxido O_2^- e hidroxilo OH, que son altamente reactivos y muy tóxicos para los microorganismos. Se considera que la inhibición del crecimiento microbiológico por parte del peróxido de hidrógeno no es el resultado de propiedades oxidativas en su estado molecular, sino la consecuencia de las actividades de otras especies químicas oxidantes derivadas del mismo, estas actuarían atacando ácidos nucleicos, enzimas y constituyentes de membrana de las células de los microorganismos. Al ser líquido, el peróxido de hidrogeno se dosifica por medio de una bomba de diafragma o pistón semejantes a las usadas en la desinfección por cloración (Flores, 2014).

A continuación, en la tabla 8 se muestran algunas ventajas y limitaciones que representa la aplicación de peróxido de hidrogeno como método de desinfección.

Tabla 8. Ventajas y limitaciones de la aplicación de peróxido de hidrogeno en el agua como agente desinfectante.

Fuente: Flores (2014)

Ventajas	Limitaciones
El peróxido de hidrógeno es un fuerte oxidante.	Es inestable y se descompone rápidamente a oxígeno y agua con liberación de calor.
Es considerado el desinfectante más natural, ya que sus metabolitos no son tóxicos para el medio ambiente, al descomponerse en oxígeno y agua, no dejan residuos.	Su eficacia disminuye en la eliminación de esporas. Alto costo de adquisición comparado con el cloro.

Alta eficacia bactericida frente a coliformes comparándolo con el hipoclorito.	La dosificación es difícil de controlar por falta de un método simple de análisis de laboratorio.
No hay formación de SPDs como en el método convencional.	
Homogeneidad en la distribución del producto.	Su agente activo (oxígeno) se pierde rápidamente por lo que no hay efecto residual.
No produce sabor ni olor en el agua tratada a diferencia de la cloración.	

El peróxido de hidrógeno es un fuerte bactericida, al descomponerse no deja residuos, no hay presencia de SPDs y no cambia las propiedades organolépticas del agua, sin embargo, es más inestable, más costoso y no deja efecto residual en comparación a la cloración.

4.2.2 Métodos físicos de desinfección.

Los métodos físicos son aquellos que se llevan a cabo en ausencia de un agente químico, estos son empleados en menor medida para la desinfección de agua en lugares de alta demanda de agua potable, en comparación con los métodos químicos. Algunos métodos físicos se emplean desde la antigüedad para asegurar la calidad microbiológica del agua como la exposición solar, la aplicación de calor (pasteurización) y la sedimentación natural, otros métodos son la radiación ultravioleta, la filtración lenta, la minifiltración entre otros.

A continuación, se describirán algunos métodos físicos alternativos a la cloración para la eliminación de microorganismos patógenos en el tratamiento de agua para consumo humano.

4.2.2.1 Desinfección solar.

La desinfección solar denominada SODIS (por su nombre en inglés *solar disinfection*) (Garrido, Da silva & Storaci, 2013), es un proceso térmico que consiste en elevar la temperatura del agua por un tiempo prolongado en contenedores acondicionados para lograr la absorción del calor proveniente de la radiación solar. Estos contenedores pueden ser de diversos materiales conductores del calor; se recomienda que sean de color negro porque absorben mejor el calor ya que este permite un aumento acelerado de la temperatura del agua y la conservación del calor por más tiempo, a diferencia de los colores claros, que por sus propiedades reflectoras almacenan menos calor (Bermudes, 2015). A continuación, en la tabla 9 se muestran algunas ventajas y limitaciones que representa la aplicación de SODIS en el agua.

Tabla 9. Ventajas y limitaciones de la aplicación de SODIS en el agua.

Fuente: Información tomada de Garrido, Da Silva & Storaci (2013), Mio (2020) y (Bermudes, 2015).

Ventajas	Limitaciones
Económico	Restringido para pequeños volúmenes,
Práctico y sencillo.	Alta dependencia de la temperatura, esta debe estar alrededor de 65° C para asegurar la eliminación de coliformes totales.
No hay presencia de SPDs.	Requiere de grandes tiempos de contacto, por lo que se lleva a cabo por lotes.

Es uno de los métodos de desinfección más sencillos y menos costosos para suministrar agua de calidad microbiológica aceptable para el consumo, este método es adecuado para comunidades que por sus condiciones económicas y socioculturales, se ponen en riesgo la sostenibilidad de otras alternativas de tratamiento y desinfección (Mio, 2020).

4.2.2.2 Desinfección con radiación ultravioleta.

La luz ultravioleta (UV) es una alternativa de desinfección al uso del cloro y el ozono en muchas aplicaciones de tratamiento de aguas potables y residuales, ya que la UV-C (luz ultravioleta de onda corta) provee desinfección efectiva por su acción germicida, sin producción de subproductos de desinfección problemáticos. El sol es una fuente de UV-C sin embargo, la absorción de radiación de longitud de onda corta por la capa de ozono, impide que alcancen la tierra cantidades significativas de UV-C (longitud de onda de 260 a 265 nm) por ello, las aplicaciones prácticas de desinfección UV dependen de fuentes artificiales de UV, las más comunes son lámparas de arco de mercurio de baja y mediana presión, en las que la radiación UV es producida como resultado de un flujo eléctrico a través de vapor de mercurio entre los electrodos de la lámpara (Wright & Cairns, 1998).

El método de desinfección es sencillo, consiste en poner en contacto el flujo de agua con una lámpara ultravioleta, de tal manera que la radiación UV actúe sobre los microorganismos del agua, a menor distancia del agua respecto al punto de emisión de los rayos, mayor será la intensidad de los mismos y por tanto la desinfección será más eficiente. Con respecto a esta condición, existe una regla general que dice que no debe haber más de 75 mm de profundidad de agua para asegurar que cada porción de la misma sea alcanzada por los rayos adecuadamente (Véliz., Aronés, Palomino & Huincho, 2018). El mecanismo de desinfección se basa en un fenómeno físico en el cual la radiación UV incide sobre el material genético (ADN) de los

microorganismos y los virus, destruyéndolos en corto tiempo, sin producir cambios físicos o químicos notables en el agua tratada (R. Véliz, 2015).

A continuación, en la tabla 10 se muestran algunas ventajas y limitaciones que representa la aplicación de luz ultravioleta en el agua.

Tabla 10. Ventajas y limitaciones de la aplicación de luz ultravioleta en el agua.

Fuente: Información tomada de Véliz (2015).

Ventajas	Limitaciones
Es eficaz para la eliminación de la mayoría de los virus, esporas y quistes.	Una baja dosificación de energía UV, puede no eliminar algunos microorganismos.
No hay formación de SPDs.	El uso de la desinfección con lámparas UV de baja presión no es tan efectivo en el caso de efluentes secundarios con niveles de SST mayores a 30 mg/l, para ello de usarse lámparas UV de mediana presión.
El proceso es sencillo para los operadores.	
Tiempo de contacto corto, en comparación con otros desinfectantes, de 10-20 segundos empleando lámparas de baja presión.	
Costos de instalación y operación bajos comparados con la cloración y ozonización.	Se requiere de un programa de mantenimiento preventivo para controlar la acumulación de sólidos en la parte externa de los tubos de luz UV.
Instalación sencilla, se necesita una conexión de energía y dos de agua.	
El proceso de desinfección no produce cambios en el color, olor, pH, conductividad o composición en la química del agua.	La turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST) en el agua hacen que la desinfección con radiación UV sea ineficiente.
El mantenimiento, limpieza y reemplazo de lámparas anualmente es simple y fácil.	Si el ADN del microorganismo no ha sido totalmente alterado, este puede repararse.

La desinfección UV es más eficaz en la eliminación de microorganismos, el tiempo de contacto es más corto, los costos de instalación y operación son más bajos y no se producen SPDs, sin embargo, la eficiencia del método se puede ver afectada por la presencia de SST y turbidez en el agua.

4.2.2.3 Desinfección por minifiltración.

A diferencia de la filtración convencional, la minifiltración emplea membranas especiales en vez de material particulado. La minifiltración incluye la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración y la ósmosis inversa. A continuación, en la tabla 11 se muestran algunas características de los métodos de minifiltración.

Tabla 11. Características de los métodos de minifiltración.

Fuente: (Solsona & Méndez, 2002)

Filtro (membrana)	Diámetro de poro [micras, μ]	Presión [psi]	Retención (Sustancias filtradas)
Ósmosis inversa	<0,001	200-1500	Sales, radicales libres
Nanofiltración	0,001-0,01	70-250	Azúcares, moléculas
Ultrafiltración	0,01-0,1	15-200	Coloides, virus
Microfiltración	0,1-0,2	10-50	Bacterias, quistes

La diferencia entre estas categorías reside en el tamaño de los poros de la membrana filtrante, la propiedad desinfectante de estas membranas depende de la capacidad que tengan para “retener” los microorganismos patógenos (Solsona & Méndez, 2002).

En la tabla 12 se muestran algunas ventajas y limitaciones que representa la aplicación de los métodos de minifiltración en el agua.

Tabla 12. Ventajas y limitaciones de la aplicación de los métodos de minifiltración en el agua.

Fuente: Información tomada de Leal (2016).

Método	Ventajas	Limitaciones
Ósmosis inversa	Retiene moléculas de peso molecular menor a 1,000 daltons y casi todas las sales disueltas.	Altos costos de inversión y de operación, las membranas se descomponen y desperdicio de agua por retrolavado (25 a 50%).
Nanofiltración	Retiene moléculas de peso molecular mayor a 1,000 daltons. Remueve bacterias, virus, quistes, material húmico y moléculas orgánicas.	Desperdicio de agua por retrolavado. Las membranas se descomponen. Agua corrosiva. Altos costos de operación.
Ultrafiltración	Retiene moléculas de peso molecular mayor a 10,000 daltons. Remueve todos los tipos de bacterias y casi todos los virus.	No retiene todos los virus, ni sustancias húmicas. Costo elevado. Las membranas se descomponen. Desperdicio de agua por retrolavado.

Microfiltración	Retiene moléculas de peso molecular mayor a 100,000 daltons. Remueve arcilla, <i>Giardia</i> , algas y bacterias.	Las membranas se descomponen. Desperdicio de agua por retrolavado. No retiene virus.
-----------------	---	--

Desde el punto de vista del tratamiento, la operación es más simple, se reducen los productos químicos para la coagulación, se remueven sólidos suspendidos y turbiedad y se disminuyen los lodos que necesitan disposición. Desde el punto de vista de la desinfección, se remueven bacterias en general, quistes de *Giardia*, *Cryptosporidium* y otros parásitos, se reducen los virus y el uso de desinfectantes químicos (si se hace precloración) (Solsona & Méndez, 2002).

A pesar de su eficacia para remover microorganismos, su aplicación no es muy común, comparado con los métodos químicos convencionales, debido a los altos costos de inversión, operación y mantenimiento, adicionalmente, estos sistemas tienen la desventaja de que requieren un desinfectante secundario para asegurar la inocuidad del agua hasta su consumo, ya que el tratamiento no proporciona efecto residual (Solsona & Méndez, 2002).

4.3 VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL AGUA, PRODUCTO DEL MÉTODO DE DESINFECCIÓN EMPLEADO PARA MEJORAR LA CALIDAD MICROBIANA

Las propiedades fisicoquímicas del agua son empleadas para determinar la calidad de la misma, en el anexo 1 se muestran los parámetros físicos y químicos (orgánicos e inorgánicos) con sus respectivos límites máximos, recopilados del documento: *Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua* por Barrenechea (2009).

A través del estudio de los diversos métodos de desinfección empleados para el aseguramiento de la calidad del agua (sección 4.2 de este documento, *Métodos de desinfección alternativos a la cloración para la eliminación de microorganismos patógenos en el tratamiento de agua*), se identificó de la información recopilada, que los parámetros fisicoquímicos que se ven afectados directamente por el método de desinfección empleado, son: Color, olor, sabor, PH y formación de SPDs.

A continuación, en la tabla 13 mediante un análisis cualitativo, se mostrará la influencia de los métodos de desinfección estudiados, con respecto, a los parámetros fisicoquímicos nombrados anteriormente. Conociendo que el agua potable es incolora, inodora, insabora, de PH aproximadamente neutro y se espera que libre de SPDs, los métodos se señalarán de la siguiente

forma: **Alto:** El método influye en gran medida en el parámetro, **Medio:** El método influye medianamente en el parámetro, **Bajo:** El método influye en menor medida en el parámetro y **Nulo:** El método no influye en el parámetro.

Nota: La clasificación se realiza asumiendo que la influencia por parte del método aplicado en el parámetro es negativa; por ejemplo, la aplicación de cloro puede cambiar el olor y el sabor del agua entonces la asignación del método será *alto*, ya que influye negativamente en gran medida sobre este parámetro (si no se lleva a cabo una adecuada dosificación).

Tabla 13. Influencia del método de desinfección en algunos parámetros fisicoquímicos.

Método de desinfección	Parámetro fisicoquímico				
	Color	Olor	Sabor	PH	Formación SPDs
Cloro	Nulo	Alto	Alto	Bajo	Alto
Ozono	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Bajo
Bromo	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Alto
Yodo	bajo	Nulo	Nulo	Bajo	Bajo
Plata	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo
Permanganato	Bajo	Nulo	Nulo	Bajo	Nulo
Ac. Peracético	Nulo	Nulo	Nulo	Bajo	Nulo
Peróxido de hidrogeno	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo
SODIS	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo
UV	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo
Minifiltración	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo

En base a lo establecido en la tabla 13 se encuentra que los métodos de desinfección en ausencia de agente químico no representan ninguna influencia negativa en el cambio de las propiedades fisicoquímicas del agua, ya que estos se llevan a cabo por calor, radiación y filtración, como es el caso del método SODIS, el UV y los métodos derivados de la minifiltración respectivamente. Sin embargo, las condiciones de estos parámetros antes de la desinfección si pueden influir en la efectividad del método. En el caso de los métodos químicos se identificó que algunos de estos agentes no influyen de forma negativa en estos parámetros, por el contrario, los mejora como es el caso de la desinfección con peróxido de hidrogeno y la plata.

En cuanto a la formación de subproductos, esta solo se ve relacionada con los métodos químicos, exactamente con los halógenos y el ozono, ya que la efectividad de estos métodos es producto de un conjunto de reacciones químicas, entre el agente químico empleado y los

componentes del microorganismo a eliminar, en el que se pueden presentar reacciones secundarias con algunos componentes presentes en el agua.

De los métodos estudiados, los que implican el uso de halógenos son los que presentan mayor influencia negativa en cuanto a la formación de subproductos, como los THMs, sustancias que se caracterizan por ser compuestos cancerígenos, que consumidos en concentraciones superiores a los límites permisibles y en tiempos prolongados pueden representar un peligro para la salud humana. En el caso del yodo, debido a su menor potencial de oxidación y menor reactividad, éste genera menos THM que los otros halógenos, por lo que la preocupación cuando se utiliza el yodo no está tanto en los SPDs formados, sino en su misma acción ya que en el mundo se han registrado numerosos casos de reacciones alérgicas de personas hipersensibles al yodo.

En cuanto a las propiedades organolépticas, el sabor y el olor están estrechamente relacionados; por eso es común decir que “A lo que huele, sabe el agua”. En términos prácticos, la falta de olor puede ser un indicio indirecto de la ausencia de contaminantes (Barrenechea, 2009), en este caso los agentes que pueden influir negativamente en estos aspectos son el cloro y el bromo. En cuanto al color del agua, este puede cambiar en algunos casos por la presencia de compuestos de naturaleza orgánica, por lo tanto, se recomienda que la desinfección se realice luego de que este haya sido removido, ya que se pueden presentar reacciones secundarias con dicha materia orgánica provocándose cambios en el color, en este parámetro la influencia se ve más relacionada a la naturaleza del agente, como en el caso del permanganato de potasio, el bromo y el yodo que son compuestos coloreados y en grandes concentraciones pueden afectar el aspecto del agua.

Por último, el PH del agua se caracteriza por estar cercano al PH neutro, los cambios en éste pueden verse relacionados por sustancias formadas en medio del proceso de desinfección como en el caso de los halógenos, en el que se forman los ácidos hipocloroso, hipobromoso e hipoyodoso que pueden aportar cierto carácter ácido al agua, al igual que el ácido peracético, cabe destacar que la influencia de los agentes químicos sobre el pH no es tan importante como la influencia del pH del agua a desinfectar en el método, ya que a condiciones no adecuadas la desinfección no se dará satisfactoriamente poniéndose en riesgo la calidad microbiológica de la misma.

5. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este documento se planteó con la necesidad de identificar un método alternativo de desinfección, que elimine o minimice la formación de subproductos, ya que algunos de estos se caracterizan por ser cancerígenos como los THMs. Un método alternativo debe cumplir no solo sanitariamente, sino también desde el punto de vista económico y práctico, ya que, si el método refleja grandes costos de inversión y operación y adicionalmente es difícil de ejecutar, siempre se elegirá el método convencional, porque a pesar de sus desventajas, se caracteriza por ser un método sencillo, económico y con buen desempeño sanitario.

En base a la información recopilada se elaboraron los siguientes cuadros comparativos con el fin de proponer un método que se ajustara a todas las necesidades anteriormente mencionadas. En la tabla 14 mediante un análisis cualitativo y en base a la información recopilada, se mostró la efectividad de los métodos de desinfección estudiados, con respecto a los microorganismos presentes en el agua, como bacterias, virus y parásitos (helmintos y protozoos) (Apella & Araujo, 2019). Conociendo que el propósito del método de desinfección es que el agua esté libre de microorganismos patógenos, se buscó que el método fuera efectivo en la eliminación de dichos microorganismos, en base a esto los métodos se señalaron de la siguiente forma: **Alto:** El método es muy eficiente, **Medio:** El método es medianamente eficiente, **Bajo:** El método es poco eficiente y **Nulo:** El método no es eficiente

Tabla 14. Efectividad del método frente a los microorganismos.

Método de desinfección	Microorganismos			
	Bacterias	Virus	Protozoos	Helmintos
Cloro	Alto	Alto	Bajo	Bajo
Ozono	Alto	Alto	Medio	Medio
Bromo	Alto	Alto	Bajo	Bajo
Yodo	Alto	Alto	Medio	Bajo
Plata	Alto	Medio	Bajo	Bajo
Permanganato	Alto	Medio	Bajo	Bajo
Ac. Peracético	Alto	Medio	Bajo	Bajo
Peróxido de hidrogeno	Alto	Medio	Bajo	Bajo
SODIS	Alto	Alto	Bajo	Bajo
UV	Alto	Alto	Bajo	Bajo
Minifiltración	Alto	Alto	Alto	Alto

De la tabla 14 se identificó que el método de desinfección con mayor eficiencia de remoción de todos los microorganismos fue la minifiltración y los métodos asociados a ella, adicionalmente se

evidenció que métodos físicos como SODIS y UV tenían un nivel de remoción similar al convencional y a sus derivados como el método con yodo y bromo, en los que se puede remover con alta eficiencia bacterias y virus, pero en menor medida los parásitos. Por otra parte, los métodos que emplean agentes químicos como plata, permanganato de potasio, ácido peracético y peróxido de hidrogeno, se comportaron de forma similar en la eliminación de los microorganismos, ya que pueden remover muy eficientemente las bacterias, medianamente eficiente los virus y en menor medida los parásitos. Cabe mencionar que ningún método estudiado presentó carácter nulo en la eliminación de microorganismos ya que esto lo descartaría totalmente como método de desinfección.

En la tabla 15 mediante un análisis cualitativo y en base a la información recopilada, se mostró el comportamiento de los métodos de desinfección estudiados, con respecto al punto de vista económico y práctico, ya que se buscaba un método que cumpliera con la eliminación de los microorganismos, pero que fuera sencillo de ejecutar y con costos de inversión operación y mantenimiento no tan elevados, para ello se evaluaron los siguientes parámetros:

❖ Prácticos:

Agente: ¿Cuál es el medio desinfectante?

Aplicabilidad: ¿A qué población va dirigida?

Complejidad: ¿Es difícil ejecutarlo?

Disponibilidad: ¿Se consiguen fácilmente los insumos y los equipos?

Mantenimiento: ¿Qué tan difícil es mantener el proceso?

Controles: ¿Se debe supervisar?

❖ Económicos:

Costos de capital (inversión de equipos) (CCAP): ¿Es muy costosa la inversión inicial?

Costos de operación y mantenimiento (COPYM): ¿Es muy costosa la operación y el mantenimiento del proceso?

En la tabla 15 para la aplicabilidad del método:

F: Útil en familias, **P:** Útil en pequeñas poblaciones, **M:** Útil en medianas poblaciones y **G:** Útil en grandes poblaciones.

En la tabla 15 para la disponibilidad del método:

Alta: Equipos, repuestos e insumos disponibles en el sitio de aplicación, **Media:** Equipos, repuestos e insumos disponibles en grandes ciudades, **Baja:** Equipos, repuestos e insumos disponibles en otros países y **Muy baja:** Equipos, repuestos e insumos disponibles en países desarrollados.

Tabla 15. Parámetros prácticos y económicos de los métodos de desinfección estudiados.

Método de desinfección	Parámetros							
	Económicos		Prácticos					
	CCAP	COPYM	Agente	Aplicabilidad	Complejidad	Disponibilidad	Mantenimiento	Controles
Cloro	Medio	Bajo	Gas	M-G	Media	Media	Medio (personal capacitado)	Muy frecuentes
Ozono	Alto	Medio	Gas	M-G	Alta	Baja	Alto y cuidadoso	Frecuentes
Bromo	Medio	Muy bajo	Solución	P-M	Muy baja	Baja	Medio (personal capacitado)	Muy frecuentes
Yodo	Medio	Bajo	Solución	F-P	Media	Baja	Simple	Muy frecuentes
Plata	Bajo-Medio	Bajo a medio	Solución	F-P	Muy baja	Baja	Simple	Muy frecuentes
Permanganato	Medio	Bajo	Solución	F-P	Baja	Baja	Medio	Frecuentes
Ac. Peracético	Medio	Bajo	Solución	P-M	Media	Baja	Medio	Frecuentes
Peróxido de H	Bajo	Bajo	Solución	F-P	Media	Media	Simple	Pocos
SODIS	Nulo	Nulo	Batch	F	Nula	Alta	Simple	Pocos
UV	Bajo-Medio	Bajo a medio	Lámpara	F-P-M-G	Baja a media	Media	Simple	Frecuentes
Minifiltración	Muy alto	Medio a alto	Filtración	P-M	Alta	Muy baja	Alto y cuidadoso	Frecuentes

De la tabla 15 se determinó que los métodos asociados a la minifiltración a pesar de ser excelentes removedores de microorganismos, son los más complejos para ejecutar, debido a los altos costos relacionados a la inversión inicial y a la operación del método, además, la adquisición de equipos no es tan sencilla como en otros casos, ya que estos se adquieren de países en desarrollo. La aplicación de la minifiltración requiere mantenimientos constantes y cuidadosos, y controles frecuentes, relacionados al uso de membranas de fácil descomposición, en las que se retienen los microorganismos; cabe resaltar que a la minifiltración se le asocia desperdicio de agua por retrolavado de dichas membranas.

El método de desinfección solar no presentó ningún problema en cuanto a costos de capital y operación, mucho menos en la ejecución, ya que es sencilla y no requiere de controles ni mantenimientos complicados, pero es difícil de escalar, por ello está dirigido a familias como un método de emergencia, ya que en las condiciones adecuadas se puede obtener agua de buena calidad por principio de pasteurización.

En el caso de los métodos de desinfección empleando como agente plata, yodo, bromo, permanganato de potasio y peróxido de hidrógeno, se identificó que la aplicación está dirigida a pequeñas poblaciones, en la mayoría de los casos son empleados como métodos de emergencia en zonas rurales donde el agua potable no llega constantemente, los costos relacionados a capital y operación son bajos, comparados con la cloración, en el caso del uso de yodo y bromo, los costos de adquisición del agente químico pueden incrementar de 5 a 20 veces más que el cloro. El mantenimiento en todos los casos no es tan complejo y no se realiza con tanta frecuencia, adicionalmente su dosificación es más sencilla ya que se emplean las sustancias en solución acuosa.

El ácido peracético es una propuesta relativamente nueva para el aseguramiento de la calidad del agua de consumo, en países como Colombia aún no se lleva a gran escala, pero por su carácter biocida y por no producir THMs en su aplicación, es un método que a futuro puede ser aplicado a todo tipo de población.

El ozono es una de las principales competencias directas de la desinfección por cloración en el mundo, ya que su carácter oxidativo puede ofrecer una mejor remoción de microorganismos que el cloro, sin embargo, su eficiencia se ve afectada por su fácil degradación, por los costos que representa la puesta en marcha y los relacionados a operación, además de requerir de controles frecuentes y un mantenimiento de gran cuidado, asimismo, la disponibilidad es baja debido a que los equipos deben ser adquiridos de países en desarrollo.

En la etapa de selección del método propuesto como alternativa a la cloración se deben tener en cuenta no solo los factores sanitarios, económicos y prácticos, sino las características de la fuente, el lugar y la comunidad, esto es importante, pues la realidad indica que no hay lugar, sistema ni comunidad que sean perfectos, esto también aplica para los métodos pues no existe la técnica perfecta, todas tienen ventajas y limitaciones.

Algunos métodos no eliminan todos los microorganismos, algunos no dejan concentración residual que proteja al agua en su abastecimiento, otros dependen de productos químicos o de equipos que no son de fácil adquisición, otros pueden producir subproductos de naturaleza cancerígena, algunos son más costosos o más difíciles de operar, teniendo en cuenta estas consideraciones, se propone a la desinfección ultravioleta como método alternativo a la cloración, ya que este se encuentra dirigido a todo tipo de poblaciones, en la actualidad sus costos compiten con los relacionados al método convencional, esta tecnología elimina bacterias, virus y parásitos con la misma o mayor eficiencia que la cloración, no se ve implicado ningún agente reactivo, por lo que no se llevan reacciones en segundo plano que produzcan SPDs, que puedan poner en riesgo la salud humana, adicionalmente su disponibilidad es amplia ya que los equipos y los repuestos se pueden conseguir en grandes ciudades, el mantenimiento es de cuidado, pero sencillo para personal capacitado, en general es un método muy interesante por la simpleza de su principio y porque su aplicación no es solo adecuada para grandes ciudades, sino también para zonas rurales las cuales están más expuestas a los malos tratamientos del agua de consumo.

Además de tener en cuenta las características de un método, se deben considerar la calidad del agua que llega a la planta de tratamiento, ya que algunas condiciones del líquido pueden poner en riesgo la eficiencia de la desinfección, y siempre se debe tener en cuenta la relación entre el agua y la salud del consumidor ya que la desinfección aún con sus limitaciones, es el obstáculo para detener el riesgo de la enfermedad, por ello la OMS y la USEPA expresan que “bajo ningún concepto debe comprometerse la desinfección del agua de consumo”.

6. CONCLUSIONES

Los métodos de desinfección empleando como agente químico plata, yodo, bromo, permanganato de potasio y peróxido de hidrogeno y la desinfección solar, pueden aplicarse en pequeñas poblaciones o en casos de emergencia en zonas rurales donde se carece de servicio de agua potable constante, ya que pueden remover bacterias virus y parásitos, los costos relacionados al arranque y operación son bajos, el mantenimiento en estos casos es sencillo y no tan habitual, comparado con el método convencional, asimismo su dosificación es menos compleja ya que las sustancias se emplean en solución.

El método de desinfección con mayor eficiencia en cuanto a la remoción de microorganismos, fue la minifiltración ya que esta presenta la capacidad de retener cualquier tipo de microorganismo, a diferencia de los otros métodos, como SODIS y UV los cuales presentaron un nivel de remoción similar al convencional y a sus derivados como el método con yodo y bromo, con estos, se puede remover con alta eficiencia bacterias y virus, pero en menor medida los parásitos. Por otra parte, los métodos que emplearon agentes químicos como plata, permanganato de potasio, ácido peracético y peróxido de hidrogeno, se comportaron de forma similar en la eliminación de los microorganismos, remueven eficientemente las bacterias, medianamente eficiente los virus y en menor medida los parásitos.

La sustitución de la cloración como método de desinfección, a pesar de la problemática de la formación de subproductos, se ve limitada por las múltiples ventajas del método, ya que por su capacidad de oxidación ataca a los ácidos nucleicos, hasta la eliminación del microorganismo, su manipulación es relativamente fácil, la desinfección es prolongada debido a su efecto residual, por lo que se asegura la calidad del agua hasta en la distribución y por último, los costos relacionados a la inversión del proceso son bajos, lo que hace atractivo a la cloración para seguir siendo el método de desinfección más comúnmente empleado en el tratamiento del agua potable.

Las propiedades fisicoquímicas del agua, no se ven afectadas por los métodos de desinfección físicos, ya que estos se basan en principios de pasteurización, radiación o filtración, sin emplear reacciones químicas, lo que impide la modificación de dichas propiedades del agua tratada, caso contrario en los métodos químicos, como en los que se emplean halógenos, que influyen negativamente en el cambio de las propiedades organolépticas, como el sabor y el olor, por último, en cuanto a los cambios en el color, estos se ven más relacionados a la naturaleza del

agente, como en el caso del permanganato de potasio, el bromo y el yodo que son compuestos coloreados y en grandes concentraciones pueden afectar el aspecto del agua.

El método seleccionado como la alternativa más viable para una posible sustitución de la cloración como método de desinfección, fue la radiación con luz ultravioleta, ya que, desde el punto de vista sanitario, esta tecnología puede eliminar bacterias, virus y parásitos con la misma o mayor eficiencia que el método convencional, adicionalmente al no implicarse el uso de ningún agente reactivo, se descartan las reacciones secundarias responsables de la formación de SPDs, reduciéndose así el riesgo de complicaciones en la salud de los consumidores. En cuanto a la parte económica, actualmente sus costos compiten con los asociados a la cloración y por último, es un método muy práctico, por su disponibilidad amplia, ya que los equipos y repuestos se pueden adquirir en grandes ciudades y su mantenimiento es sencillo para personal capacitado. En general es un método adecuado por la sencillez de su principio y porque su aplicación se encuentra dirigida a todo tipo de poblaciones, no es solo adecuada para grandes ciudades, sino también para zonas rurales, las cuales están más expuestas a tratamientos indebidos del agua de consumo.

7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Las tecnologías avanzadas de eliminación de microorganismos patógenos, las cuales se constituyen por la combinación de métodos de desinfección como: Ozono y peróxido de hidrógeno, ozono y radiación UV, peróxido de hidrógeno y radiación UV, radiación UV con dióxido de titanio, tecnologías de membranas y otros métodos que se encuentran en estudio actualmente, son interesantes para abordar en próximas investigaciones, ya que estas, son la conjugación de métodos físicos y químicos, en las que se busca aprovechar las ventajas de cada método con el fin de mejorar el rendimiento de la desinfección y reducir la formación de SPDs.

Plantear de qué forma se puede sustituir el método convencional, por un método alternativo, aprovechando las instalaciones y equipos ya implementados actualmente en las plantas de tratamiento para la etapa de desinfección, ya que en algunos casos no se realiza la sustitución del método de eliminación de microorganismos patógenos, por qué los costos de arranque pueden alcanzar cifras elevadas.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [ATSDR]. (2000). *RESUMEN DE SALUD PÚBLICA C loroformo* (Vol. 1). http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs6.pdf

Agency Enviromental Protection. (n.d.). *Desinfección de Emergencia del Agua Potable*. http://water.epa.gov/aboutow/ogwdw/emerg_spanish.cfm

Anastasi, E. M., Wohlsen, T. D., Stratton, H. M., & Katouli, M. (2013). Survival of *Escherichia coli* in two sewage treatment plants using UV irradiation and chlorination for disinfection. *Water Research*, 47(17), 6670–6679. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.008>

Apella, M. C., & Araujo, P. Z. (2019). Microbiología de agua. Conceptos básicos. In *SOLAR SAFE WATER* (pp. 33–50). <https://doi.org/10.31819/9783954871568-002>

Asociación Española de Abastecimientos de agua y saneamiento. (2000). *Manual de la Cloración*. [https://www.asoaeas.com/sites/default/files/Documentos/AEAS.Manual de la Cloracion.pdf](https://www.asoaeas.com/sites/default/files/Documentos/AEAS.Manual%20de%20la%20Cloracion.pdf)

Barrenechea, A. (2009). Capitulo 1 Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. In *International Angiology* (Vol. 28, Issue 4, p. 55).

Bermudes, D. (2015). *Desinfección solar para abastecimiento de agua de consumo humano a nivel domiciliario en el sector de la Pereira, Parroquia la Avanzada, Canton Santa Rosa, Provincia del Oro*.

Bevan, R., Nocker, A., & Sobesy, M. (2018). *Bromine as a drinking-water disinfectant Alternative drinking-water disinfectants: bromine*. <http://apps.who.int/bookorders>.

Bracho, N., Castillo, J., Vargas, L., & Morales, R. (2009). Formación de trihalometanos durante el proceso de desinfección en la potabilización de agua. *Revista Tecnica*, 32(3), 231-238.

Brinsa. (2018). *FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD CLORO*.

Burgos, A., & Toro, D. (2018). *ÁCIDO PERACÉTICO COMO ALTERNATIVA DE*

DESINFECCIÓN EN EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO. In *Journal of Chemical Information and Modeling*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Cáceres, J. R. (2018). *Uso de iones de plata y ozono en el tratamiento de agua para consumo humano*.

Cánepa de Vargas, L. (1998). Filtración lenta como proceso de desinfección. In Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente–CEPIS–, Organización Panamericana de la Salud–OPS–, Lima, Perú. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/fulltext/simposio/ponen12.pdf>. [Acceso: Diciembre 2, 2009].

Carl Roth GmbH. (2017). *Ficha de datos de seguridad - Triclorometano / Cloroformo*. 2006(1907), 15. www.carlroth.de

Chulluncuy-Camacho, N. C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería industrial*, (029), 153-170.

Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Benigna, I., Sorlini, S., & Torretta, V. (2018). Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants. *Sustainability (Switzerland)*, 10(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su10010086>

Comisión Europea. (2009). *Fichas Internacionales de Seguridad Química, Ozono*.

Córdova Suárez, M. A., Gavilanes López, J. V., Ruíz Robalino, O. E., & Vega Pérez, J. G. (2018). Desarrollo del proceso de ozonización en la planta de tratamiento de agua envasada de la Empresa Pública Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato (EP-EMAPA-A). *Ciencia Digital*, 2(3), 428-442. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v2i3.167>

Deininger, R. A., Skadsen, J., Sanford, L., & Myers, A. G. (1998, October). KMNO 4. In Simposio regional sobre calidad del agua: desinfección efectiva/Lima (Vol. 27, p. 9).

Flores, M. (2014). *DESINFECCIÓN DE AGUAS, UTILIZANDO UN AGENTE OXIDANTE Y SU COMBINACIÓN CON UV. ESTUDIO CINÉTICO*.

Francy, D. S., Stelzer, E. A., Bushon, R. N., Brady, A. M. G., Williston, A. G., Riddell, K. R., Borchardt, M. A., Spencer, S. K., & Gellner, T. M. (2012). Comparative effectiveness of membrane bioreactors, conventional secondary treatment, and chlorine

and UV disinfection to remove microorganisms from municipal wastewaters. *Water Research*, 46(13), 4164–4178. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.04.044>

Garrido, I., Da silva, R., & Storaci, V. (2013). Evaluación del método “SODIS” en la desinfección del agua para abastecimiento en La Guadalupe, Chirgua, municipio Bejuma del estado Carabobo. *Revista INGENIERÍA UC*, 20(2), 29–38.

González, C. (2004). La desinfección y el almacenamiento domiciliario del agua: intervención fundamental en la salud pública. In *Rev. Técnica de vigilancia*. <http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/vigilancia/rtv0404.pdf>

Innovación tecnológica catalana (ITC). (2006). *Cloración de agua potable*. 28. <http://www.itc.es/es/>

Ishaq, M. S., Afsheen, Z., & Khan, A. (2018). Disinfection Methods. In *Photocatalysts-Applications and Attributes*. IntechOpen.

Jaimes, J. A., & Vera, J. A. (2020). *Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización Wastewater treatment of the pharmaceutical industry through*. 84(2), 2–15.

Jia, S., Jia, R., Zhang, K., Sun, S., Lu, N., Wang, M., & Zhao, Q. (2020). Disinfection characteristics of *Pseudomonas peli*, a chlorine-resistant bacterium isolated from a water supply network. *Environmental Research*, 185(October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109417>

Jihoon, J. (2014). EVALUATION OF BROMINE FOR DISINFECTION OF DRINKING WATER. In *Gait and Posture*. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.03.005>

Jiménez, C. Á. (2015). ¿Cómo es el avance en la cobertura de acueducto en Colombia? *El tiempo*, 24.

Khayyat, A. M. A. (2000). Study of point of use treatment methods for the disinfection of drinking water in Nepal (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

Leal, T. (2016). *Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones*.

Linares, I., Lucero, M., Velazquez, S., Jiménez, M. del C., & Islas, M. (2018). Fundamentos y avances en la desinfección de agua residual. *Ciencias Del Agua*:

Perspectivas Desde La Academia, March. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/80348>

Liu, J., Lujan, H., Dhungana, B., Hockaday, W. C., Sayes, C. M., Cobb, G. P., & Sharma, V. K. (2020). Ferrate(VI) pretreatment before disinfection: An effective approach to controlling unsaturated and aromatic halo-disinfection byproducts in chlorinated and chloraminated drinking waters. *Environment International*, 138(December 2019), 105641. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105641>

López Jiménez, E. V. (2016). Subproductos de la cloración del agua, su formación, reglamentación y riesgos para la salud humana (Bachelor's thesis, Quito: UCE).

Martillo, J. E. (2018). *Enriquecimiento de Zeolita con plata para la desinfección de agua del Río Babahoyo.*

Martin, L. (19 de Noviembre de 2014). Water Online. Obtenido de EPA Investigates Chlorine Alternative: <http://www.wateronline.com/doc/epa-investigates-peracetic-acid-as-a-greenalternative-to-chlorine-0001>

Medeiros, R. C., & Daniel, L. A. (2017). Cloração de esgoto sanitário: variação de cloro residual e o uso de parâmetros facilmente mensuráveis na indicação de breakpoint. *Revista DAE*, 65(206), 87–98. <https://doi.org/10.4322/dae.2016.030>

Mio, C. (2020). *EXPERIENCIAS DE LAS MADRES EN LA DESINFECCIÓN SOLAR DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO CENTRO POBLADO MENOR DE CALLANCA – MONSEFÚ, 2018.*

Molina, J. E., & Morales, S. A. (2018). El derecho humano al agua potable en Colombia: decisiones del estado y de los particulares. *Vniversitas*, 67(136), 1-14.

Muñoz, R. (2019). *EFICIENCIA DEL SISTEMA DE CLORACIÓN POR GOTEJO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO DEL CASERÍO CAUCHAMAYO - CELENDÍN.*

Orbegoso, J. S., & Quispe, T. celsio. (2014). *OZONIZACIÓN EN LA FACULTAD DE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SYSTEM WATER TREATMENT BY OZONIZATION IN THE FACULTY OF CHEMICAL ENGINEERING AND METALLURGICAL 2012.* 3(4), 3–7.

Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2006). Guías para la calidad del agua potable.

In *WHO Chronicle* (Vol. 1, Issue 3).

Organización de Naciones Unidas. (2015). Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo.

Quirós, F. (2005). Tratamiento de Desinfección del Agua Potable. In *Canal Educa*.
<http://www.canaleduca.com/documents/10157/19805/Tratamiento+de+desinfecci+n+d+el+agua+potable>

Quirós, F. R. (2005). Desinfección del agua con cloro y cloraminas. *Tecnica Lindustrial*, 55–63.

Ramirez, R., & Durán, A. (n.d.). *Influencia del proceso de adsorción en la demanda en cloro de un agua superficial clarificada*.

Reyes, U., & Nicasio, D. (2016). Análisis de la cantidad de cloro residual libre en el agua de los bebederos públicos en la zona centro de la ciudad de León, Guanajuato. *Jóvenes En La Ciencia. Verano de Investigación Científica*, 2(1), 546–550.

Rodríguez, M. H. (2016). *Desinfección de agua residual con ácido peracético*.

Rojas, M., Ruz, X., & González, R. (n.d.). *Yodación de agua potable con fines de desinfección*.

Romero, M. (2008). Tratamientos utilizados en potabilización de agua. *Boletín Electrónico [Internet]*. [citado 2012 jun 16], 8, 1-12.

Sallés, F. (2010). *TÉCNICAS DE ANÁLISIS ESPACIAL APLICADAS A LA RESOLUCIÓN DE UN PROBLEMA EN SALUD PÚBLICA: LA EXPOSICIÓN A CLOROFORMO Y EL BAJO PESO AL NACER EN MONTEVIDEO ENTRE 2009 Y 2010*.

Scarpino, P. V., Lucas, M., Dahling, D. R., Berg, G., & Chang, S. L. (1974). Effectiveness of hypochlorous acid and hypochlorite ion in destruction of viruses and bacteria. In *Symposium on the Chemistry of Water Supply, Treatment, & Distribution*.

Solsona, F., & Méndez, J. P. (2002). *Desinfección de agua*.

Soluciones, WT (2012). Lenntech

Vallejo-Vargas, O. I., Beltrán, L., Franco, P., Montoya-Navarrete, C. H., Alzate-

Rodríguez, E. J., & Reyes, H. (2015). Determinación de trihalometanos en aguas de consumo humano por microextracción en fase sólida- cromatografía de gases en Pereira, Colombia. *ReV. COLOMBIA QUIMICA*, 44(1), 23–29.

Véliz, R. (2015). *DESINFECCIÓN DEL EFLUENTE SECUNDARIO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE AYACUCHO MEDIANTE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA CON FINES DE MEJORAR SU CALIDAD*.

Véliz, R. R., Aronés, E. G., Palomino, Y. G., & Huincho, R. (2018). Desinfección Del Efluente Secundario De La Planta De Agua Residual De Ayacucho Con Radiación Ultravioleta Para Su Reutilización En Riego Agrícola. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 84(1), 41–56. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v84i1.164>

Watson, K., Farré, M. J., & Knight, N. (2012). Strategies for the removal of halides from drinking water sources, and their applicability in disinfection by-product minimisation: A critical review. *Journal of Environmental Management*, 110, 276–298. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.023>

Weber, W. J. (1979). Control de la Calidad del Agua/Water Quality control: procesos fisicoquímicos. Reverté.

Wright, H., & Cairns, W. (1998). Desinfección de agua por medio de Luz Ultravioleta. *Trojan Technologies Inc.*, 1–28. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Desinfecci+n+de+agua+por+medio+de+luz+ultravioleta#0>

9. ANEXOS

Anexo 1. Criterios de calidad para el agua potable.

Fuente: (Barrenechea, 2009)

Parámetros		Regulaciones Internas Primarias	Guías de Calidad para el Agua de Bebida del Canadá-1978 (2)	Guidelines for Drinking-Water Quality OMS, 1996 (3)
Unidades		Nivel máximo del contaminante	Concentración máxima aceptable	Valor guía
Físicos				
Color	TCU	—	15	15
Sabor y olor		Aceptable	—	Aceptable
Turbiedad	UNT	5 ^a	5	5 ^b
Inorgánicos				
Aluminio	mg/L	—	—	0,2
Amonio	mg/L	—	—	1,5
Antimonio	mg/L	0,006	—	0,005 ^(p)
Arsénico	mg/L	0,05	0,05	0,01 ^r
Bario	mg/L	2,0	1,0	0,7
Boro	mg/L	—	5,0	0,3
Cadmio	mg/L	0,005	0,005	0,003
Cianuro	mg/L	0,2	0,2	0,07
Cinc	mg/L	—	5,0	3
Cloro	mg/L	—	—	5 ^d
Cloruro	mg/L	—	250	250
Cobre	mg/L	1,3 ^m	1,0	2 ^d
Cromo (total)	mg/L	0,1	0,05	0,05 ^(p)
Fluoruro	mg/L	4	1,5	1,5
Hierro	mg/L	—	0,3	0,3
Manganeso	mg/L	—	0,05	0,5 ^(p)
Mercurio	mg/L	0,002	0,001	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	10	10	50
Nitrito (como N)	mg/L	1	1,0	3
pH	—	—	6,5 - 8,5	—
Plata	mg/L	—	0,05	0
Plomo	mg/L	0,015 ^m	0,05	0,01
Selenio	mg/L	0,05	0,01	0,01
Sulfato	mg/L	—	500	250
Sulfuros (H ₂ S)	mg/L	—	0,05	0,05 ^(e)
Sólidos disueltos	mg/L	—	500	1.000

Parámetros		Regulaciones Internas Primarias EPA (2000)	Guías de Calidad para el Agua de Bebida del Canadá-1978 (2)	Guidelines for Drinking-Water Quality OMS, 1996 (3)
Orgánicos	Unidades µg/L	Nivel máximo permitido	Concentración máxima aceptable	Valor guía
Aldrin + dieldrin	µg/L		0,7	0,03
Benceno	µg/L	5	—	10 ^e
Carbofurano	µg/L	40	—	5
Clordano	µg/L	2	7	0,2
Clorobenceno	µg/L	100	—	—
Cloroformo	µg/L	—	100	200 ^e
DDT	µg/L	—	30	2
Dioxina	µg/L	0,00003	—	—
Endrin	µg/L	2	0,2	—
Fenoles	µg/L	—	2	—
Heptacloro + heptacloro-epóxido	µg/L	0,6	3	0,03
Lindano	µg/L	0,2	4	2
Metoxycloro	µg/L	40	100	20
Monocloramina	µg/L	—	—	3.000
Parathión	µg/L	—	35	—
PCB	µg/L	0,5	—	—
Plaguicidas (total)	µg/L	—	100 ^b	—
Tetracloruro de carbono	µg/L	5	—	2
Tolueno	µg/L	1.000	—	700 ^d
Toxafeno	µg/L	3	5	—
2,4-D	µg/L	70	100	30
2,4,5-TP	µg/L	50	10	9
Trihalometanos	µg/L	100	350	f

TCU: Unidades de Color Verdadero.

UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad.

(^e) Valor guía provisional.

(^h) En las concentraciones normalmente encontradas, no se ha detectado daño en la salud.

* La Regla de Tratamiento de Agua de Superficie requiere que los sistemas que usan agua de superficie o subterránea bajo influencia directa de agua de superficie: (1) desinfecten el agua y (2) filtren el agua o realicen el mismo nivel de tratamiento que aquellos que filtran el agua. El tratamiento debe reducir los niveles de *Giardia lamblia* (parásito) en 99,9% y los virus en 99,99%. La *Legionella* (bacteria) no tiene límite, pero la EPA considera que si se inactivan la *Giardia* y los virus, la *Legionella* también estará controlada. En ningún momento la turbiedad (enturbiamiento del agua) puede superar las 5 UNT (los sistemas filtrantes deben asegurar que la turbiedad no supere una UNT [0,5 UNT para filtración convencional o directa] en al menos 95% de las muestras diarias de cualquier mes); HPC: no más de 500 colonias por mililitro.

* Turbiedad promedio para una efectiva desinfección: = 1 UNT. Muestra simple: = 5 UNT.

^c Por ser consideradas sustancias cancerígenas.

^d Concentraciones establecidas porque a concentraciones mayores, se pueden ver afectados el sabor, el olor y la apariencia del agua.

^e Cuando nitrato y nitrito están presentes, la suma de las dos concentraciones no debe exceder 10 mg/L.

^f La suma de la razón entre la concentración de cada uno y su respectivo valor guía no debe exceder de 1.

^g Se aplica cuando más de un plaguicida considerado en las guías de calidad están presentes en el agua.

^h Relacionado con el olor y el sabor del agua.

** El plomo y el cobre se regulan mediante una técnica de tratamiento que exige la implementación de sistemas que controlen el poder corrosivo del agua. El nivel de acción sirve como un aviso para que los sistemas públicos de agua tomen medidas adicionales de tratamiento si los niveles de las muestras de agua superan en más de 10% los valores permitidos.