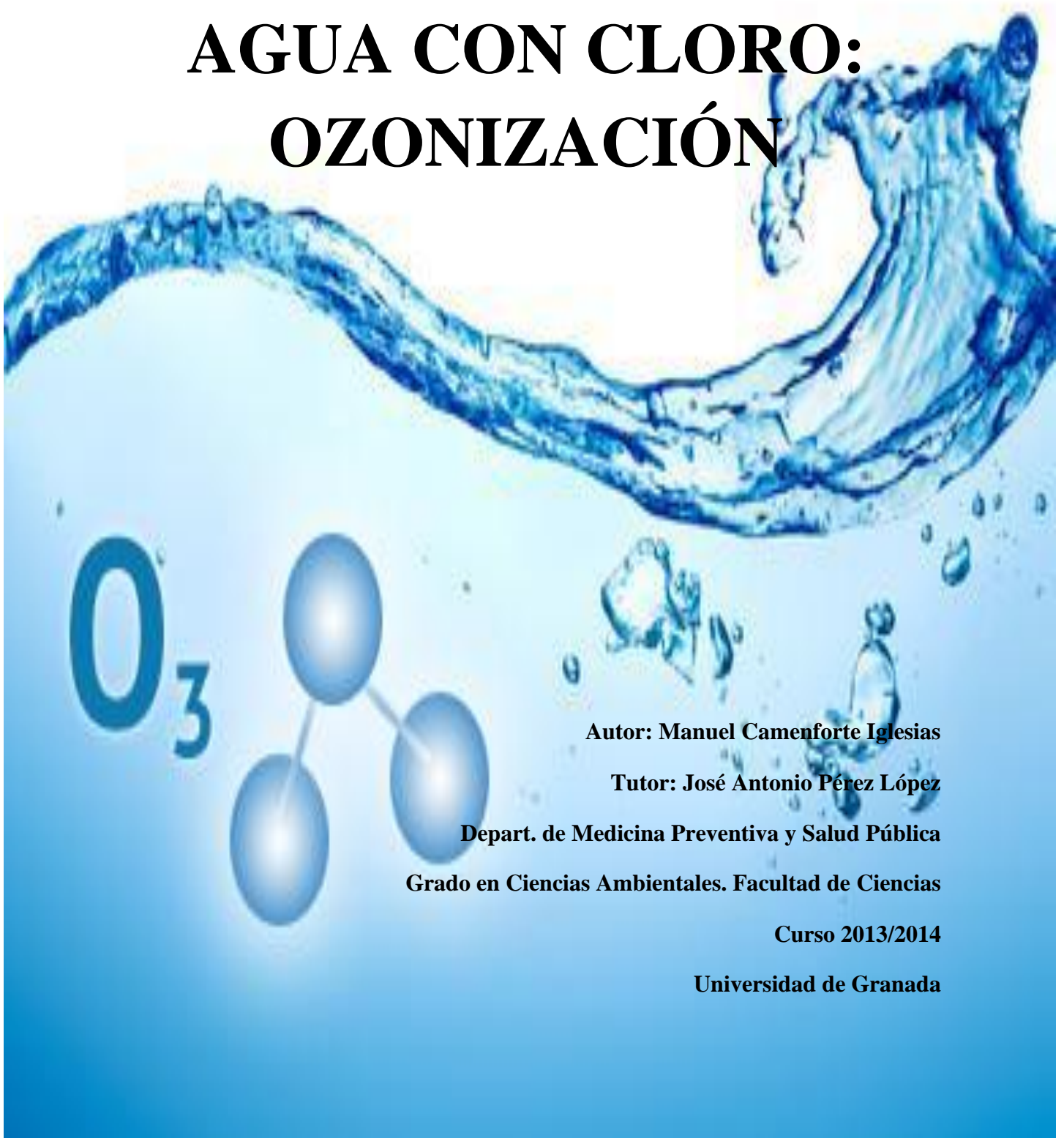




ALTERNATIVA A LA DESINFECCIÓN DEL AGUA CON CLORO: OZONIZACIÓN



Autor: Manuel Camenforte Iglesias

Tutor: José Antonio Pérez López

Depart. de Medicina Preventiva y Salud Pública

Grado en Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias

Curso 2013/2014

Universidad de Granada

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN

2.- EL OZONO

3.- OZONIZACIÓN

4.- COMPARACIÓN ENTRE CLORACIÓN Y OZONIZACIÓN

5.- CONCLUSIONES

6.- BIBLIOGRAFÍA

1.- INTRODUCCION

La desinfección del agua es el último paso de los que constituyen su proceso de potabilización y, qué duda cabe, el que garantiza su calidad bacteriológica para el consumo. Hasta las últimas décadas del siglo XX, el desinfectante por excelencia ha sido el cloro y sus derivados, pero una serie de estudios y de constataciones sobre sus efectos secundarios y colaterales le ha puesto en el ojo del huracán, y las dudas sobre su idoneidad crecen según avanzan los tiempos. La caída de la “popularidad” del cloro ha ido acompañada por la subida espectacular de un compuesto cuyas bondades parecen no tener fin: el ozono. Dentro de este entramado de compuestos oxidantes, en los que también se vislumbra una cierta guerra comercial entre la potente industria química del cloro y la de productores de instalaciones de ozono, nada es blanco ni negro y, como casi siempre, las tonalidades grises son las que se acaban imponiendo.

El cloro como agente desinfectante ha sido catalogado por muchos autores como uno de los mayores avances del siglo XX y argumentos no faltan: posiblemente sea el agente químico aplicado al beneficio de la salud humana que más millones de vidas ha salvado durante el pasado siglo (Deininger et al, 1998). El otro lado de la moneda fue la aparición y desarrollo de nuevas técnicas analíticas, a partir de la década de los setenta, que reveló la presencia de compuestos orgánicos en el agua, hasta entonces no identificados, y su fácil reacción con el cloro, formando unos subproductos, los trihalometanos, que fueron catalogados como potencialmente peligrosos para la salud. Este hecho obligó a los responsables de los suministros de agua potable a buscar nuevas alternativas a la cloración y, a partir de aquí, la irrupción del ozono ha ido de menos a más. En la actualidad, se ha convertido en un duro competidor del resto de los agentes químicos oxidantes utilizados en la desinfección del agua de abastecimiento.

No obstante, conviene hacer mención al resto de agentes que han estado y posiblemente estarán en uso en las diferentes líneas de tratamiento de las estaciones potabilizadoras, considerando, además, que es muy frecuente la combinación de más de un agente oxidante en las citadas instalaciones.

La desinfección, desde un punto de vista sanitario, no es otra cosa que la adecuación bacteriológica del agua a unos estándares previamente establecidos (R.D. N° 140/2003). Esto implica fundamentalmente la eliminación de microorganismos patógenos y otras formas de vida potencialmente peligrosas para la salud humana como esporas, quistes o parásitos. Gran parte de esta vida microscópica es destruida, eliminada o retenida en los distintos procesos fisicoquímicos de una planta de tratamiento convencional: coagulación/floculación, sedimentación y filtración (Cánepa de Vargas, L 1998). No obstante es necesaria una desinfección para garantizar unas condiciones sanitarias óptimas en el grifo del consumidor. Las condiciones que debe tener un desinfectante ideal para su utilización en una planta de tratamiento son:

- Elevada capacidad de eliminación de todo tipo de patógenos.

- Escasa interferencia con las características del agua: pH, temperatura y otros compuestos químicos.
- No formación de subproductos indeseables con potencial peligro para la salud, o de sabor u olor desagradables.
- Tiempo de reacción con el agua adecuado.
- Que tenga efecto residual.
- De fácil obtención y fabricación.
- De sencilla manipulación y baja peligrosidad en la misma.
- Margen de seguridad adecuado en la dosificación.
- Bajo coste.

La desinfección del agua para consumo humano puede ser de tipo químico o físico. De tipo físico puede ser a través de calor o radiación ultravioleta; de tipo químico existe el cloro gas, hipoclorito sódico, dióxido de cloro, cloraminas, ozono, peróxido de hidrógeno y otros como yodo, bromo y plata ionizada (Laubusch, E.J., 1975). Las de tipo químico aprovechan fundamentalmente la capacidad oxidante de los compuestos químicos para desarrollar su eficiencia desinfectante y son de uso mucho más corriente; las de tipo físico utilizan la aplicación directa de energía, térmica o de radiaciones (Reiff et al, 1995). Dentro de la desinfección por métodos químicos, los compuestos más comúnmente empleados son el cloro, hipoclorito sódico, dióxido de cloro, permanganato potásico y ozono. Otros productos como las cloraminas, yodo, bromo o peróxido de hidrógeno son de uso muy limitado o excepcional.

El principal método no químico de desinfección es la radiación ultravioleta por luz artificial, pero su uso a gran escala en instalaciones de tratamiento de agua potable es muy restringido, debido a su elevado coste y su específica aplicación (Chang, J.C.H. et al. 1985). A la vista de los diferentes métodos, casi la totalidad de los abastecimientos españoles utilizan los agentes químicos para la desinfección del agua. No obstante, su uso no suele ser unitario, sino que es muy frecuente el uso combinado de dos o hasta tres compuestos en una misma planta potabilizadora en distintos puntos del proceso, con lo que se pretende minimizar los efectos secundarios de los diferentes oxidantes y potenciar, a la vez, sus cualidades.

Es preciso aclarar que la desinfección del agua nada tiene que ver con su esterilización: un agua desinfectada suele contener un número considerable de microorganismos que son causantes en muchas ocasiones del crecimiento bacteriano en las redes de distribución. La desinfección implica únicamente la eliminación del agua potable de organismos patógenos y con esta denominación se involucra a bacterias, virus, quistes y esporas que estén contempladas en la legislación vigente (R.D. N° 140/2003). Este último concepto es muy importante, pues algún microorganismo que no necesariamente tenía que ser eliminado en la anterior normativa puede ser de obligada eliminación en la presente y, por ello, las características exigidas a los desinfectantes

pueden cambiar de manera notable. Una vez aclarado esto, es preciso señalar que el desinfectante perfecto no existe. Los gestores de los abastecimientos públicos deben de realizar una labor de experimentación y estudio, siempre y cuando el presupuesto lo permita, sobre la idoneidad de un compuesto o una combinación de ellos para el agua a tratar. Habitualmente la solución siempre viene dada por la aplicación de varios productos en distintas fases del tratamiento.

Como norma general, para optimizar la eficacia de la desinfección hay que tener en cuenta dos factores: las características intrínsecas del agua y las propiedades específicas de los desinfectantes.

La eficiencia de la desinfección de una determinada agua se ve afectada, en primer lugar, por las variables fisicoquímicas de pH y temperatura: por regla general, a mayor temperatura mayor es el poder germicida de los desinfectantes. En cuanto al pH, aunque a valores extremos son destruidos la mayor parte de los microorganismos, cada desinfectante tiene un rango de pH en el que presentan una efectividad óptima. Así, por ejemplo, a una misma temperatura y un mismo tiempo de contacto, la dosis de cloro necesaria para destruir el 100% de *Escherichia coli* debe ser 8 veces superior a pH 9,5 que a pH 7 (Scarpino, P.V. et al., 1974).

Otro factor fundamental que influye en los resultados de la desinfección es el tipo de microorganismos que contiene el agua, pues la sensibilidad de cada especie a los distintos biocidas es bastante diferente. Generalmente, y en las mismas condiciones, ordenados de menor a mayor resistencia, los menos resistentes son las células vegetativas de las bacterias, después los virus, esporas bacterianas y, por último, los quistes de protozoos, aunque, naturalmente, se registran grandes variaciones entre las distintas especies (Reiff et al., 1995).

La última característica, y quizá una de las más importantes en cuanto a la efectividad de los compuestos desinfectantes, es la presencia de materia orgánica en el agua. Este hecho es doblemente significativo, puesto que, en primer lugar, la protección que ejerce la materia en suspensión a los patógenos hace ineficaz, en muchas ocasiones, la acción de cualquier agente. En segundo lugar, determinados compuestos orgánicos naturales como los húmicos y fúlvicos actúan de precursores de la formación de trihalometanos cuando se utilizan el cloro y algunos de sus derivados como desinfectantes.

Se observa que tanto las propiedades del desinfectante como su aplicación en planta afectan de manera significativa al proceso biocida (Hof, J.C. and Akin, E.W., 1986). La capacidad germicida de los desinfectantes varía enormemente de unos a otros en las mismas condiciones. En la siguiente tabla viene recogida la capacidad desinfectante de los diferentes agentes químicos:

Compuestos	General	Bacterias	Virus	Quistes
Ozono	++++	++++	+++	++
Cloro/hipoclorito	+++	++++	++	+
Dióxido de cloro	+++	++++	++	+
Permanganato	++	+++	++	-

Esta capacidad va asociada, entre otros, a la concentración aplicada de desinfectante y al tiempo de contacto de éste con el agua. Así, ocurre que pequeñas dosis de cloro con un tiempo de contacto de horas tienen la misma capacidad germicida que una dosis elevada con un tiempo de actuación de minutos. Esta constatación tiene gran importancia a la hora de evitar los crecimientos bacterianos en las tuberías de distribución y, por tanto, la presencia de contaminación biológica de un agua en el grifo del consumidor que salió de la estación potabilizadora en perfectas condiciones.

2.- EL OZONO

El ozono fue descubierto en 1785 por Van Mauten y es en 1857 cuando Werner von Siemens diseña el primer generador de ozono. En 1893 se usó por primera vez para desinfección del agua en Holanda, y 1906 se aplica en una planta de tratamiento en Niza por la *Compagnie Générale des Eaux de Bon Voyage*. En los últimos 25 años, los mayores avances y desarrollos en este campo, han propiciado una importante mejora en los equipos productores y un mayor empleo en la desinfección del agua, (BABLON, G.; et al., 1991).

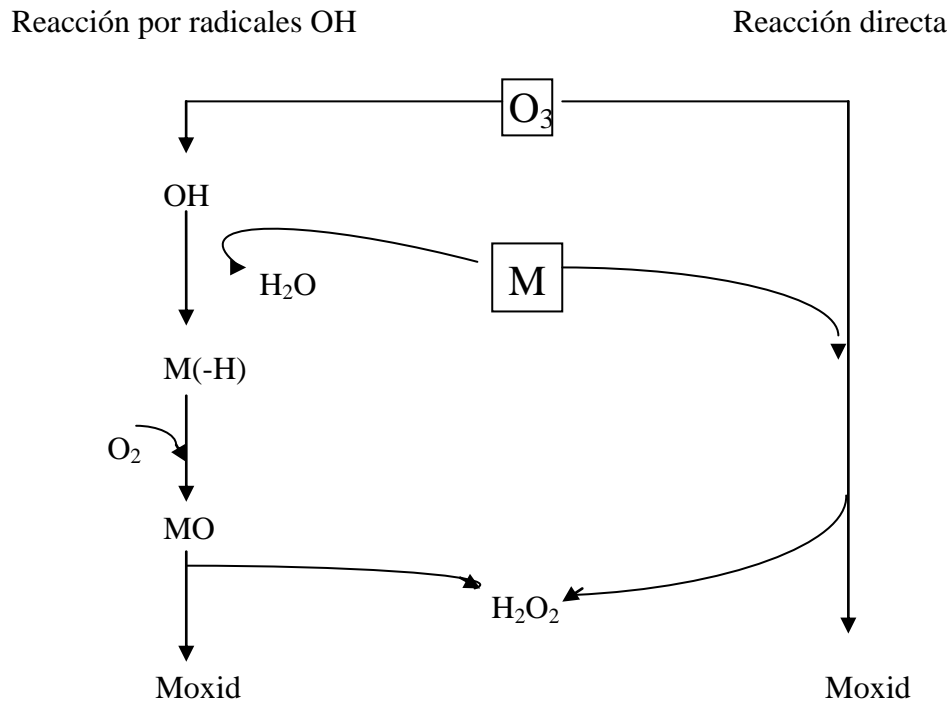
El ozono (O₃) es un gas alótropo del oxígeno; se produce cuando las moléculas de oxígeno son disociadas por alguna fuente de energía produciendo átomos de oxígeno que posteriormente chocan y se unen a una molécula de oxígeno formando el ozono (Pérez López et al., 1999). A temperatura y presión ambiente es un gas inestable que se descompone rápidamente para volver a O₂. El ozono es de color azulado, tiene un olor muy característico, pudiéndose percibir después de tormentas eléctricas. Es poco soluble en agua y muy volátil, llegándose a perder en su aplicación hasta un 10% por volatilización. Debido a la inestabilidad del ozono, éste no se puede almacenar sino que debe generarse en el mismo momento de su utilización. La mitad de la vida del ozono en el aire es de unos 20 minutos en el agua es muy variable, dependiendo de diversos factores (temperatura, pH, sustancias presentes en el agua, etc.).

Algunas propiedades físicas del ozono, además de las ya mencionadas, son:

- Peso molecular48
- Temperatura de condensación-112 °C
- Temperatura de fusión..... - 192,5 °C

- Densidad..... 1,32
- Densidad (líquido a $-182\text{ }^{\circ}\text{C}$).....1,572 gr/ml
- Peso de un litro de gas (a 0° y 1 atm.).....1,114 gr

El ozono es un oxidante muy energético (su potencial de oxidación es 2,07 voltios, mientras el del cloro es 1,36 voltios, el del dióxido de cloro es 0,95 V, el del permanganato potásico es 1,68 V, el del agua oxigenada es 1,76 V), sus reacciones se realizan por medio de dos mecanismos: reacciones directas que atacan a los dobles enlaces y algunos grupos funcionales y reacciones indirectas que son debidas a la acción de los radicales hidroxilos que se originan al descomponerse el ozono en el agua (Bablon, G. et al., 1991). Es utilizado como tal en la desinfección del agua, está comprobada su eficacia en oxidación de materias orgánicas e inorgánicas (entre éstas últimas destacan el hierro y manganeso).



Su poder oxidante y desinfectante, mayor que el del cloro, le hace más eficaz que éste en la eliminación del olor, sabor y color del agua, así como en la eliminación de bacterias, virus y otros microorganismos. Las sustancias que dan olor y sabor al agua se pueden englobar en varios grupos: 1) Compuestos inorgánicos que originan sabor como el hierro, manganeso, cobre y cinc y compuestos inorgánicos que dan olor como es el caso del ion sulfhídrico SH^- . 2) Compuestos orgánicos, subproductos del metabolismo de ciertas algas cianofíceas y actinomicetos, como la geosmina y el 2-

metilisoborneol (MIB), así como de otras que originan principalmente alcoholes, aldehídos aromáticos, cetonas y esterres. También la oxidación de algunos aldehídos, precisamente con el ozono, origina sustancias que provocan olor y sabor. 3) Contaminantes de origen industrial como pesticidas, disolventes, etc. 4) Subproductos generados al reaccionar el cloro residual con materia orgánica ya sea en la planta o en la planta o en la red de distribución.

Debido a las propiedades altamente oxidantes del ozono, éste es un irritante que afecta especialmente los ojos y el sistema respiratorio, y puede ser peligroso aun en concentraciones bajas. Para proteger a los trabajadores potencialmente expuestos al ozono, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos (OSHA, en inglés) ha establecido un límite de exposición permisible (PEL, en inglés) de 0.1 $\mu\text{mol/mol}$, que es calculado como un promedio ponderado de ocho horas. Los ámbitos ocupacionales en los que se utiliza el ozono o en los que es probable que se produzca deberán tener una ventilación adecuada, y es prudente contar con un monitor de ozono que haga sonar una alarma cuando se exceda el PEL de la OSHA. La OSHA ha establecido límites para los ambientes de trabajo, los cuales se presentan en la siguiente tabla (EPA, 1999):

Exposición	Límites
Olor detectable	0,01-0,05 ppm
Tos/irritación 8min	1 ppm
Tos/irritación 1min	4 ppm
Límite OSHA 8horas	0,1 ppm
Límite OSHA 15 min	0,3 ppm
Concentración mortal en < 1 min	10000 ppm

El proceso de eliminación del olor, sabor, color, bacterias, virus y otros microorganismos del agua se conoce como ozonización.

La ozonización es una buena alternativa a la cloración, (principalmente en la preoxidación), cuando en el agua hay fenoles y otras sustancias orgánicas precursoras de trihalometanos. Los fenoles por la adición de cloro forman clorofenoles de sabor y olor muy desagradables, aún en concentraciones tan pequeñas como 0,01 mg/l. Los precursores de trihalometanos suelen ser sustancias orgánicas naturales como los ácidos húmicos, fúlvicos y tánicos, generalmente de procedencia vegetal, que a la vez comunican a las aguas superficiales una determinada coloración. Sobre estas sustancias orgánicas, con enlaces dobles entre átomos de carbono, actúa el ozono rompiéndolos y a medida que esto sucede, no solo el color va desapareciendo, sino que los propios precursores de los trihalometanos se van eliminando.

Las nuevas normativas para la calidad del agua potable se preocupan mucho por estos subproductos de la desinfección; por esta razón el uso del cloro está empezando a no ser la mejor opción para la desinfección de agua potable. Además, la inactivación de virus y otros microorganismos como el *Cryptosporidium* requiere altas dosis de cloro que causan mayores concentraciones de subproductos. Por lo tanto lo ideal sería un desinfectante potente que genere bajas cantidades de subproductos, como el ozono.

3.-OZONIZACIÓN

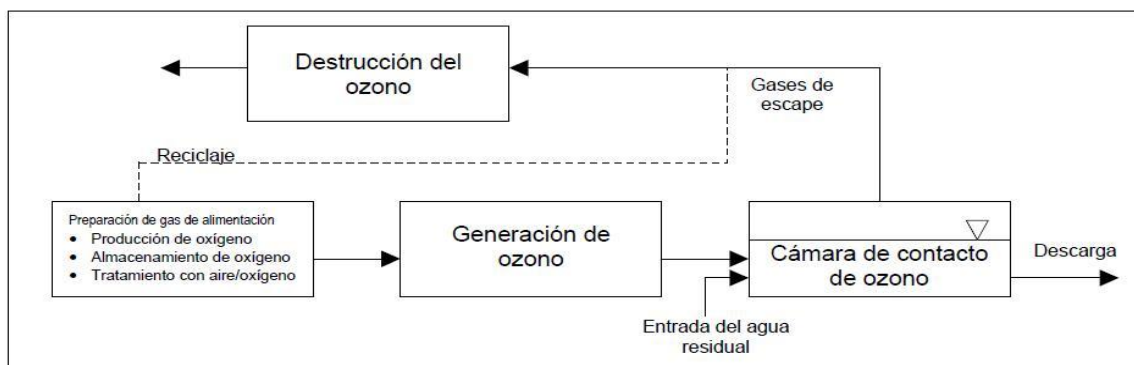
En la potabilización del agua el ozono se puede aplicar en las diferentes fases o etapas del proceso:

- Preozonización: se realiza al comienzo del tratamiento incorporando el ozono al agua bruta, con lo cual, a la vez que se realiza una primera desinfección, se puede eliminar el hierro y manganeso y, también, ayudar al proceso de coagulación, especialmente en aguas con elevada dureza.
- Ozonización intermedia: se puede aplicar antes de la filtración y en este caso, además de oxidar a la materia orgánica natural, favorece su eliminación biológica en los filtros de arena.
- Postozonización: se emplea en la fase final, a la salida de la planta.

A veces suele utilizarse simultáneamente en dos de las etapas de tratamiento o en las tres mencionadas.

En la ozonización la eficacia de la desinfección depende de la susceptibilidad de los organismos a ser tratados, del tiempo de contacto y de la concentración de ozono. Los componentes de un sistema de ozonización son: la preparación del gas de alimentación, la generación del ozono, el contacto del ozono que suele realizarse bien por difusores de burbuja o mediante inyectores del tipo Venturi y la destrucción del ozono que se realiza por destrucción térmica o bien por destrucción catalítica con catalizadores de paladio, óxido de níquel o manganeso.

En la figura siguiente se muestra un esquema de los diferentes componentes (Deiningner et al, 1998):



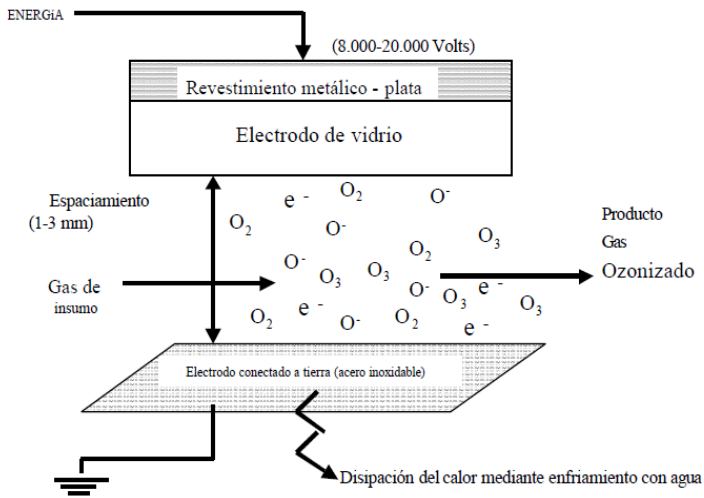
El ozono se produce en un generador de ozono. El gas de alimentación puede ser aire u oxígeno puro. Aproximadamente de 1 a 10 por ciento del oxígeno que fluye por los electrodos se transforma en ozono. Cuando se utiliza aire, la concentración de ozono a la salida del ozonizador varía entre el 1 y el 4 por ciento y si se emplea oxígeno puro, la concentración suele oscilar entre el 4 y el 12 por ciento en peso. En cualquier caso, el ozono en su empleo industrial, ya sea partiendo del aire o del oxígeno puro, se obtiene por descarga eléctrica alterna de alta tensión (6.000V-20.000V) y/o frecuencia, para evitar la formación de un arco eléctrico (descarga eléctrica silenciosa), entre dos electrodos separados por un medio dieléctrico, generalmente vidrio. En los ozonizadores industriales, los dos electrodos son tubos concéntricos, el exterior de acero inoxidable y el interior un tubo de vidrio, que consta de una fina capa metálica depositada en la cara interna. El ozonizador está integrado por múltiples conjuntos de estos pares de tubos concéntricos. Alrededor de 80 a 95 por ciento de la energía se convierte en calor, la que se debe eliminar del electrodo conectado a tierra, generalmente mediante enfriamiento por agua.



La producción de ozono en estos equipos, está sujeta a una serie de parámetros interrelacionados, que influyen en gran medida en la eficaz generación o producción de ozono y que podrían reunirse en tres grupos:

- Parámetros del sistema: longitud del sistema de descarga, anchura del espacio de descarga y configuración y espesor del dieléctrico.
- Parámetros del proceso: concentración y producción del ozono y el rendimiento o necesidades de energía específica.
- Parámetros operacionales: tipo de tensión, frecuencia, densidad de potencia, presión de trabajo, temperatura de trabajo, velocidad de corriente del gas, composición y humedad del gas empleado.

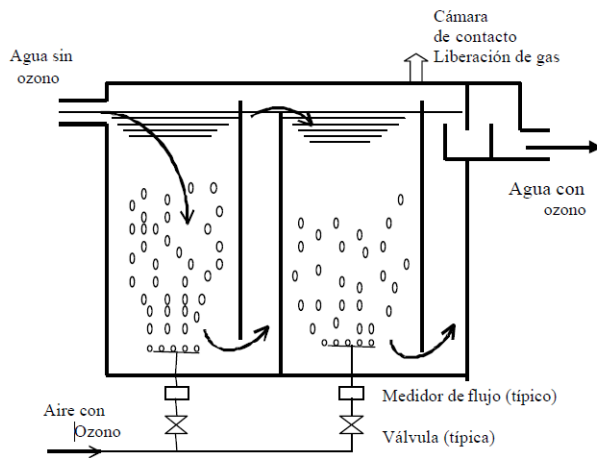
En la imagen siguiente se puede visualizar el proceso de generación de ozono (Deininger et all, 1998).



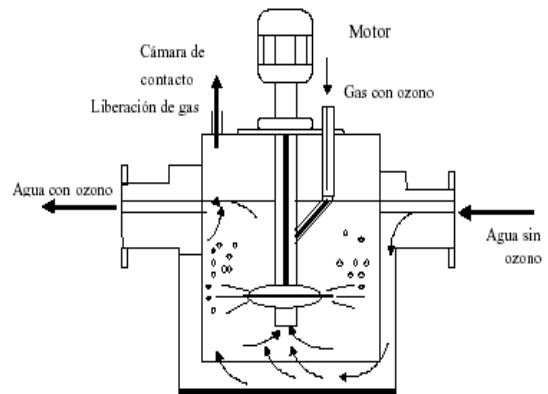
Los sistemas de alimentación de aire tienen que extraer el polvo y la humedad del aire. Esto se puede hacer mediante el uso de filtros, secadoras y compresores. El inconveniente de usar el aire como gas de alimentación es que se necesita mucha maquinaria y supervisión, en definitiva mucha mano de obra. El sistema de oxígeno puro usa oxígeno líquido (OXL) y es mucho más sencillo, ya que sólo necesita un vaporizador.

Para que el ozono realice bien la desinfección es necesario que entre en contacto con el agua a tratar y dispersarse de la manera más fina posible. Normalmente, esto se realiza a través de difusores de burbujas finas en cámaras de contacto. Los tipos de cámaras de contacto de burbujas difusas más utilizados son: inyección de presión positiva, de presión negativa, de agitación mecánica y las torres de lecho fijo. Los difusores de cámara con deflectores parecen ser los más comunes.

Cámara de contacto con deflectores



Difusor de turbina



Una cámara de contacto de ozono típica generalmente tiene varios compartimentos en serie con difusores de burbuja en el fondo. En el primer compartimiento, el agua fluye hacia abajo en sentido contrario al de las burbujas, que ascienden, y en el segundo compartimiento el agua fluye hacia arriba. Las cámaras se cubren para prevenir el escape de ozono y aumentar la presión parcial del ozono en la cámara. Las cámaras adicionales garantizan el tiempo de contacto entre el ozono y el agua. Cada una de las cámaras tiene puntos de muestreo para que se pueda determinar la concentración de ozono en cada cámara. Esto es necesario para calcular la concentración del producto y tiempo de retención a fin de conseguir el valor concentración por tiempo requerido. La última cámara todavía debe tener una concentración de ozono de 0,1 ppm (Deininget et all, 1998).

El gas liberado por las cámaras de contacto de ozono generalmente excede el límite establecido de 0,1 ppm por lo que el ozono restante se tiene que reciclar o destruir. El gas liberado pasa primero por un dispositivo que captura gotitas de agua en una malla de acero inoxidable. Luego, el gas se calienta y pasa por una unidad de destrucción que contiene un catalizador para acelerar el proceso. El requerimiento de energía oscila entre 1 y 3 kw por cada 100 pcpm (pies cúbicos/minuto estándar), es decir, 3 m³/min del flujo de gas.

En una planta de tratamiento de agua, los monitores de ozono supervisan continuamente las concentraciones de ozono en el agua de las celdas de la cámara de contacto, en el aire en contacto con el flujo de los gases liberados, y en el aire ambiental dentro y alrededor de la planta de ozono. Las alarmas generales se activan ante una concentración de 0,1 ppm y los generadores de ozono se detienen instantáneamente ante una concentración de 0,3 ppm. Este es un gran avance con respecto a la prueba del "olfato" usada en las plantas antiguas de Europa (Reiff et all, 1995).

Las paralizaciones de los sistemas de ozono debido a fugas son raras, pero sí ocurren debido a fugas en los accesorios y grifos de muestreo. Sin embargo, los operadores en las plantas de tratamiento de agua probablemente estén mejor protegidos que los residentes urbanos.

4.-COMPARACIÓN ENTRE CLORACIÓN Y OZONIZACIÓN

Actualmente, tanto en el conjunto del planeta como en nuestro país, el desinfectante más ampliamente utilizado en todos los abastecimientos es el cloro y sus afines (hipoclorito sódico o dióxido de cloro).

La implantación del ozono en esta última década, una vez superados los problemas de un excesivo coste y un complicado mantenimiento, ha sido importante, sobre todo en instalaciones de tamaño entre medio y grande. No obstante, todo el cloro y sus derivados están presentes incluso en las plantas de tratamiento que cuentan con ozonización, y es que el cloro sigue siendo necesario a la hora de garantizar un efecto desinfectante residual en la red de distribución.

➤ *Cloro y derivados*

Dentro de la familia del cloro, los dos compuestos más utilizados son el cloro gas, en grandes instalaciones y el hipoclorito sódico, en instalaciones medias y pequeños abastecimientos. Más raramente se utiliza dióxido de cloro que, pese a ser un excelente desinfectante y no formar trihalometanos, su difícil manejo, sus elevados costes de instalación y el peligro de aparición de cloritos y cloratos, le hacen poco competitivo y con una introducción en nuestro país muy pequeña. En peor posición se encuentran las cloraminas, cuya utilización es casi testimonial debido a su baja capacidad biocida y su toxicidad intrínseca.

Es por ello que el interés de los desinfectantes de base clorada, se centra en los dos primeros, cuyas particularidades tanto en sus propiedades físico-químicas como en su comportamiento en la desinfección son muy similares.

Los compuestos de cloro reaccionan con un sinnúmero de compuestos presentes en el agua como los aminoácidos, amoníaco, materia orgánica, hierro, manganeso y otros. De esta variedad de reacciones el resultado es una amplia gama de subproductos como son los trihalometanos (THM), los ácidos haloacéticos (AHA), clorofenoles, halocetonas y

las cloraminas. De todos ellos, los de mayor incidencia sanitaria son actualmente los dos primeros. En la siguiente tabla se representa una comparativa entre diferentes desinfectantes con algunas de sus características:

Compuesto	Formación Trihalometanos	Formación de otros subproductos	Eliminación de Fe y Mn	Eliminación de NH₃	Coste
Ozono	Nula	Media	Muy bueno	Malo	Alto
Cloro	Alta	Media-Alta	Bueno	Muy bueno	Bajo
Dióxido de cloro	Nula	Media-Alta	Bueno	Malo	Medio
Permanganato	Escasa	Nula	Muy bueno	Regular	Bajo

El cloro puede ser adicionado en diferentes puntos del sistema de tratamiento, como desinfectante único o en combinación con otros oxidantes. Al objeto de evitar la formación de THM y otros subproductos indeseables, las plantas de tratamiento evitan la utilización del cloro como oxidante al principio del tratamiento, es decir, la precloración. Esta adición sólo es aconsejable en dos situaciones: la primera, cuando la materia orgánica de entrada y la turbidez del agua tienen valores muy bajos, (esto es agua de excelente calidad); la segunda, cuando con agua de mala calidad se disponen de filtros de carbón activo al final del proceso de tratamiento, que conlleva la adsorción de los THM y otros compuestos no deseables. En caso de aguas turbias o con elevada concentración de compuestos húmicos y fúlvicos, es recomendable una oxidación con permanganato, previa a la floculación o a la entrada de filtros, y la utilización del cloro como desinfectante final.

La siguiente tabla representa una lista de los subproductos y desinfectantes residuales que se generan:

DESINFECTANTES	ORGÁNICOSHALOGENADOS
Cloro libre Ácido hipocloroso Ión hipoclorito	Trihalometanos Cloroformo Bromodiclorometano Dibromoclorometano Bromoforno
Cloramínas Monocloramínas	Ácidos haloacéticos
Dióxido de cloro	Ácido monocloroacético Ácido dicloroacético Ácido tricloroacético Ácido monobromoacético Ácido dibromoacético
INORGÁNICOS	Haloacetoniilos Dicloroacetoniilo
Clorato Clorito Bromato Iodato Peróxido de hidrógeno Amonio	Bromocloroacetoniilo Dibromoacetoniilo Tricloroacetoniilo Haloce tonas 1,1-Dicloropropanona 1,1,1-Tricloropropanona
ORGÁNICOS	Clorofenoles 2-Clorofenol 2,4-Diclorofenol 2,4,6-Triclorofenol
Aldehídos Formaldehído Acetaldehído Gloxal Hexanal Heptanal	Cloropicrín Hidrato de cloral Cloruro de cianogeno N-Organocloramínas MX*
Ácidos Carboxílicos Ácido hexanóico Ácido heptanóico Ácido oxálico	
Carbón orgánico asimilable	

* 3-Cloro-4-(diclorometil)-5-hidroxi-2(5H)-furanona

El cloro y el hipoclorito son buenos germicidas, aceptables viricidas y algicidas, pero tienen poca capacidad para la eliminación de quistes de protozoos. Estas cualidades se ven afectadas de manera muy importante por el pH y por la turbidez del agua. En cuanto al primero, debe tenerse en cuenta que la introducción de cloro en el agua conduce a su dismutación y a la formación de ácido hipocloroso y éste, a su vez, se disocia en equilibrio con el ion hipoclorito en una reacción dependiente del pH. Pues bien, el primero es cien veces más eficiente como germicida que el ion hipoclorito.

Así pues, para optimizar la eficiencia del cloro, tanto en su aplicación como cloro gas o hipoclorito se debe de buscar siempre un pH en un rango entre 6,5-7. En condiciones ligeramente alcalinas, la dosificación debe de ser mucho mayor, por lo que el margen de seguridad disminuye significativamente.

Por otro lado, la turbidez del agua tiene una importancia extraordinaria en la adición de cloro: en primer lugar, porque una turbidez elevada implica una concentración apreciable de materia orgánica u otros elementos y la consiguiente formación de subproductos como THM o AHA y, en segundo lugar, porque los patógenos enmascarados con la protección de las partículas de materia orgánica son

inaccesibles a las moléculas de cloro, sea cual sea la concentración de éste, por lo que la calidad bacteriológica del agua será inadecuada.

En la siguiente tabla se muestra la clasificación sanitaria de subproductos y desinfectantes:

- (1)
 Grupo A: Carcinógeno humano
 Grupo B: Probable carcinógeno humano
 Grupo C: Posible carcinógeno humano
 Grupo D: No clasificable
 Grupo E: Sin evidencias de carcinogénesis
- (2)
 Basado en exposición por inhalación

Producto	Clasificación ⁽¹⁾
Cloroformo	B2
Bromodichloro metano	B2
Dibromo clorometano	C
Bromoformo	B2
Ácido monocloroacético	--
Ácido dicloroacético	B2
Ácido tricloroacético	C
Dicloroacetoniitrilo	C
Bromocloroacetoniitrilo	--
Dibromoacetoniitrilo	C
Tricloroacetoniitrilo	--
1,1-Dicloropropanona	--
1,1,1-Tricloropropanona	--
2-Clorofenol	D
2,4-Diclorofenol	D
2,4,6-Triclorofenol	B2
Cloropicrín	--
Hidrato de cloral	C
Cloruro de cianogeno	--
Formaldehído	B1 ⁽²⁾
Clorato	--
Clorito	D
Bromato	B2
Amonio	D
Ácido hipocloroso	--
Hipoclorito	--
Monocloramina	--
Dióxido de cloro	D

Por último, el cloro tiene otras cualidades apreciables como la eliminación de hierro y manganeso al formar óxidos insolubles de fácil retención en los filtros y la eliminación de olores y sabores cuando son originados por las algas.

➤ *Ozono*

Pese a que la aplicación industrial del ozono como desinfectante del agua de consumo es relativamente reciente, su primera aplicación experimental con idénticos fines se debe al francés De Meriteus. Lo utilizó en 1886, pero fueron otros dos franceses, Calmette y Roux, en 1899, los que lo utilizaron para la desinfección de grandes cantidades de agua. Desde entonces, la utilización del ozono ha sido esporádica y se ha empleado en multitud de procesos industriales, pero hasta la década de los noventa no ha sido un serio competidor del cloro como equipo de desinfección en las plantas potabilizadoras.

Una de las principales características del ozono es su poder oxidante, superior en mucho a cualquier compuesto de cloro, lo que, unido a su capacidad de penetración y poder de bloqueo de rutas metabólicas o respiratorias, le confiere unas extraordinarias virtudes como desinfectante: es el mejor. Su capacidad germicida es veinte veces superior a la del ácido hipocloroso y el tiempo de contacto necesario para ejercer su acción es de minutos, aunque naturalmente, depende de la dosis aplicada. Asimismo, es un buen viricida y, aunque como el cloro, su capacidad de destrucción de quistes de protozoos es limitada, es superior a la de aquel (Rice, R.G., 1986).

Los factores que influyen en su eficacia son similares a los que afectan al cloro, pero en distinta escala: el rango óptimo en función del pH es muy amplio (5,5-9,5). Temperaturas entre 5 °C y 35 °C no afectan significativamente a su eficiencia y la presencia de materia orgánica no supone riesgo de formación de subproductos indeseables, ya que degrada a las sustancias precursoras de los THM (Wang, Y.T.; Pai, P.CH. and Latchav, J.L., 1989).

El ozono, por otra parte, lleva menos tiempo en el mercado que el cloro y, por tanto, sus efectos secundarios no deseados están todavía por descubrir. No obstante, se le conocen ya algunos inconvenientes que es preciso reseñar: su elevado poder oxidante, que tiene como ventaja la eliminación del riesgo de formación de THM, produce un aumento del carbono orgánico disuelto biodegradable que está relacionado con el crecimiento bacteriano en las redes de distribución; por otra parte, en aguas con elevada concentración de bromuros se pueden formar bromatos y, por último, su escaso poder residual hace necesario el uso de un desinfectante como el cloro adicionado en la fase final del sistema de tratamiento (Glaze, W.H., 1986).

La todavía escasa implantación del ozono se debe, sin duda, tanto a sus elevados costes de adquisición de los equipos como de su posterior mantenimiento. La reducción de los precios de los equipos, en los últimos años, no ha dejado de situar a la ozonización como el sistema más caro de todos los existentes y su mantenimiento, que requiere personal especializado, es todavía el talón de Aquiles de estos sistemas.

5.-CONCLUSIONES

Llegar a decantarse hacia uno u otro desinfectante es algo complicado. Es conveniente, en todo caso, observar la práctica diaria en diferentes plantas potabilizadoras para llegar a ver y distinguir entre las ventajas e inconvenientes teóricos y los resultados en planta.

La desinfección por cloro, tanto si es cloro gas como hipoclorito, tiene ventajas operacionales en su fácil manejo y dosificación. Respecto a sus inconvenientes desde el punto de vista sanitario, la formación de trihalometanos (THM), es evitable realizando una preoxidación con permanganato potásico en cabecera de planta. El problema surge cuando en muchas instalaciones existentes, el cloro se dosifica en cabecera y al final del proceso, ya que multiplica las probabilidades de producir agua con un exceso de THM, ácidos haloacéticos (AHA), clorofenoles y otros subproductos indeseables.

El ozono es un excelente desinfectante y, además, mejora otros procesos de la potabilización, como la coagulación/floculación, pero sus costes operacionales son todavía elevados y su mantenimiento complejo. Tiene efecto residual escaso y, pese a que la nueva normativa del agua para consumo humano permite la ausencia de desinfectante residual en la red de distribución, ningún gestor de abastecimientos va a asumir el riesgo que ello supone, por lo que siempre se tiene que dosificar cloro al final del tratamiento. Para lograr un agua de calidad óptima es necesario su concurso, pues elimina gran parte de los olores y sabores del agua y casi no genera subproductos.

En consecuencia, la desinfección ideal es aquella que combina dos o más desinfectantes. Los más ventajosos son los siguientes: permanganato-cloro, ozono-cloro y permanganato-ozono-cloro.

6.-BIBLIOGRAFÍA

BABLON, G.; BELLAMY, W.D.; BOURBIGOT, M.M.; DANIEL, F.B.; DORÉ, M.; ERB, F.; GORDON, G.; LANGLAIS, B.; LAPLANCHE, A.; LEGUBE, B.; MARTIN, G.; MASSCHELEIN, W.J.; PACEY, G.; RECKHOW, D.A. and VENTRESQUE, C. Fundamental aspects. In Langlais, B.; reckhow, D.A. and Brink, D.R. *Ozone in water treatment. Application and Engineering*. pp: 11-132. Ed. Lewis

CÁNEPA DE VARGAS, L. Filtración lenta como proceso de desinfección. Memorias del Simposio: Calidad del agua. Desinfección efectiva. Lima (Perú). 1998.

CHANG, J.C.H.; OSSOFF, S.F.; LOBE, D.C.; DORFMAN, M.H.; DUMAIS, C.M.; QUALLS, R.G. and JOHNSON, J.D. UV inactivation of pathogenic and indicator microorganisms. *Appl. Environ. Microbiol.*, 49(6):1361-1365. 1985.

Deininger, R.; Skadsen, J.; Sanford, L.; Myers, A. “Desinfección del agua con ozono.” Trabajo presentado en el Simposio OPS: Calidad de Agua, Desinfección Efectiva (1998). Publicado también en CD-Rom. Disponible en la OPS/CEPIS

EPA; “Desinfección con ozono” Folleto informativo de tecnología de aguas residuales (1999)

Glaze, W.H. Reaction products of ozone: a review. *Environ. Hlth. Perspectives*, 69: 151-157. 1986.

HOF, J.C. and AKIN, E.W. Microbial resistance to disinfectants: mechanisms and significance. *Environ. Hlth. Perspectives*, 69: 7-13. 1986.

<http://www.hidritec.com/hidritec/ozono>

<http://www.elaguapotable.com/ozonizacion.htm>

LAUBUSCH, E.J. Cloración y otros procesos de desinfección. En *The American Water Works Association Inc. Control de calidad y tratamiento del agua*. Ed. Instituto de Estudios de Administración Local. Madrid. 1975.

Pérez López J.A., Fernández-Crehuet Navajas, M. “Desinfección del agua”; *En Estudio sanitario del agua*. Ed. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Granada. (1995).

Real Decreto por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. R.D. N° 140/2003 (Feb. 7, 2003). B.O.E. núm. 45, (Feb. 21, 2003).

Reiff, F.; Witt, V. Guía para la selección y aplicación de tecnologías de desinfección del agua para consumo humano en pueblos pequeños y comunidades rurales en América Latina y el Caribe. Documento OPS/OMS, Serie Técnica N.º 30 (1995).

Rice, R.G., *Analytical Aspects of Ozone Treatment of Water and Wastewater*. Lewis Publishers, ISBN 0-87371-064-9. 1986 .

SCARPINO, P.V. et al. Effectiveness of hypochlorous acid and hypochlorite ion in destruction of viruses and bacteria. In: A.J. Rubin. Chemistry of Water Supply, Treatment and Distribution. Ann Arbor, Michigan: Ann Arbor Science;: 359. 1974.

SONNTAG, C. von and SCHUCHMANN, H.P. UV disinfection of drinking water and by-product formation-some basic considerations. J Water SRT–Aqua., 41(2): 67-74. 1992.

WANG, Y.T.; PAI, P.CH. and LATCHAV, J.L. Effects of preozonation on the methanogenic toxicity of 2,5-dichlorophenol. Journal Water Pollution Control, 61: 320-326. 1989.