

OZONO

Rolf A. Deininger

Facultad de Salud Pública
Universidad de Michigan
Ann Arbor, Michigan, EUA

Janice Skadsen y Larry Sanford

Planta de Tratamiento de Agua de Ann Arbor
919 Sunset Road
Ann Arbor, Michigan, EUA

Anthony G. Myers

CH2MHILL
310 W. Wisconsin Avenue
Milwaukee, Wisconsin, EUA

RESUMEN

Aunque el ozono se conoce y usa en el tratamiento del agua desde hace más de 100 años, su empleo como desinfectante en la industria del agua no está muy difundido. Las estadísticas no son muy confiables, pero probablemente lo usan menos de 1 por ciento de las plantas de tratamiento de agua en el mundo.

La principal razón de su poco uso son los costos. Comparado con el cloro, resulta mucho más caro. Por ello es comprensible que su uso nunca se haya difundido, ya que la industria del agua siempre ha tratado de proveer agua potable al menor costo.

Sin embargo, esta situación está cambiando y, de hecho, muy rápidamente. Los reglamentos para los subproductos de la desinfección en Europa y Estados Unidos y las pautas de organizaciones internacionales, como las de la Organización Mundial de la Salud, obligan a las empresas de agua a reducir los trihalometanos en el agua potable, lo que en muchos casos hace imposible el uso continuo del cloro. Este hecho, junto con la insistencia por parte de los consumidores de recibir agua potable sin sabor ni olor, apunta al uso del ozono ya que éste no sólo desinfecta sino que también reduce el color y olor mediante la oxidación de las sustancias orgánicas que se encuentran en el agua.

Este documento describe en forma detallada el proceso de ozonización y, a modo de ejemplo, la reconversión del proceso de tratamiento en la ciudad de Ann Arbor, Michigan, donde se construyó una planta de ozonización del agua hace dos años. Aunque siempre se cumplieron las normas de calidad del agua, el sabor y el olor no siempre fueron buenos y aceptables. Luego de la instalación del proceso con ozono, el agua de Ann Arbor fue considerada la de mejor sabor de Michigan.

1. Introducción

El ozono puede ser considerado como un desinfectante “huérfano” porque, en todo el mundo, su uso en las plantas de tratamiento de agua es muy bajo. No obstante, se le conoce desde hace más de cien años y la línea de tiempo que se presenta a continuación muestra su desarrollo (Rice,1986):

- 1785 von Marum describe un olor característico en una máquina electrostática.
- 1801 Cruikshank percibe el mismo olor en un ánodo.
- 1840 Schoenbein le denomina a la sustancia ozono por la palabra griega “ozein” que significa “heder, oler”.
- 1857 Werner von Siemens diseña un generador de ozono, de tipo dieléctrico, cilíndrico.
- 1893 Oudshoorn, se construye la primera planta en Holanda.
- 1906 Niza, Francia, planta Bon Voyage, “lugar de nacimiento de la ozonización en una planta de tratamiento de agua”.

En los Estados Unidos, antes de 1980 existían menos de 10 plantas; en 1995 su número llegaba casi a 100 y más de 50 se encontraban en la etapa de diseño o construcción (deMers,1996). En Europa funcionan miles de plantas. Entonces, ¿por qué no hay más plantas que usen ozono? La sencilla razón es que la industria del agua siempre ha estado preocupada por los costos y ha tratado de proporcionar agua al costo más bajo posible. El cuadro 1 muestra los costos relativos y representativos de los productos químicos usados en las plantas de tratamiento de agua e indica claramente que el cloro es un desinfectante mucho más barato (Akness, 1996). Pero cuando se le considera junto con otros productos químicos, su costo no es exorbitante.

Cuadro 1. Costo unitario de los productos químicos

Producto químico	Precio unitario \$/kg	Dosis mg/L	Costo/1.000m ³ Agua
Ozono	,50	3	6
Cloro	,10	4	2
KMNO ₄	,60	4	10
CAP (carbón)	,20	5	4
Alumbre	,06	25	8
Coadyuvante de la coagulación	,80	1	3
Polifosfato	,60	1	2

La situación está cambiando y en realidad muy rápidamente. Los nuevos reglamentos para la calidad del agua potable, en particular la preocupación por los subproductos de la desinfección, como los trihalometanos, hacen que el uso del cloro ya no sea una opción. Además, la inactivación de virus y otros microorganismos como el *Cryptosporidium* requeriría altas dosis de cloro que causarían mayores concentraciones de subproductos. Por consiguiente, la elección ideal es un desinfectante potente con bajos niveles de subproductos. Comparado con otros desinfectantes como el cloro, la cloramina y el dióxido de cloro, el ozono es el desinfectante más potente y también el de más rápida acción. El cuadro 2 muestra los valores de concentración por tiempo (CT) para la inactivación de los y *Giardia* tomados del documento de orientación de la EPA (USEPA, 1991).

Cuadro 2. Valores CT para la inactivación por ozono

	Temperatura (°C)				
	5	10	15	20	25
Inactivación de Giardia					
0,5 log	0,32	0,23	0,16	0,12	0,08
1,0 log	0,63	0,48	0,32	0,24	0,16
1,5 log	0,95	0,72	0,48	0,36	0,24
2,0 log	1,3	0,95	0,63	0,48	0,32
2,5 log	1,6	1,2	0,79	0,60	0,40
3,0 log	1,9	1,4	0,95	0,72	0,48
Inactivación de virus					
2,0 log	0,6	0,5	0,3	0,25	0,15
3,0 log	0,9	0,8	0,5	0,4	0,25
4,0 log	1,2	1,0	0,6	0,5	0,3

* (Fuente: USEPA, 1991)

Estos valores CT son el producto de la concentración de ozono en mg/l y el tiempo medido en minutos. Cuando la temperatura es baja, se requieren valores más altos que cuando la temperatura es alta. Los valores para una reducción de 3 logaritmos (99,9%) varían de 0,3 a 1,0. Por otro lado, los valores para la inactivación de bacterias se encuentran alrededor de 0,1 (Reiff, 1992). Así, queda claro que por el momento la inactivación de virus y microorganismos está totalmente determinada por los valores CT.

2. El proceso de ozonización

Existen tres componentes en un sistema de ozonización: el generador de ozono, el contactor de ozono y un dispositivo de destrucción de ozono.

2.1 La generación de ozono

El ozono se produce en un generador de ozono. El gas de insumo puede ser aire u oxígeno puro. Se aplica un voltaje alto (6.000-20.000 V) a dos electrodos y este voltaje produce un arco. En el arco, parte del O_2 se transforma en O_3 . El ozono es muy inestable y vuelve a convertirse en O_2 en minutos. Por ello, el ozono debe generarse en el lugar ya que no se le puede enviar hasta la planta de tratamiento. Aproximadamente de 1 a 10 por ciento del oxígeno que fluye por los electrodos se transforma en ozono. Cuando se utiliza aire como gas de insumo, la concentración de ozono varía entre 1 y 4 por ciento. Cuando se usa oxígeno puro, la concentración se encuentra entre 4 y 12 por ciento, en términos de peso. 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. Las variables operativas son la energía aplicada, la eficiencia y el diseño del generador, el flujo del gas de insumo y la temperatura. En la figura 1 se muestra un diagrama de este proceso.

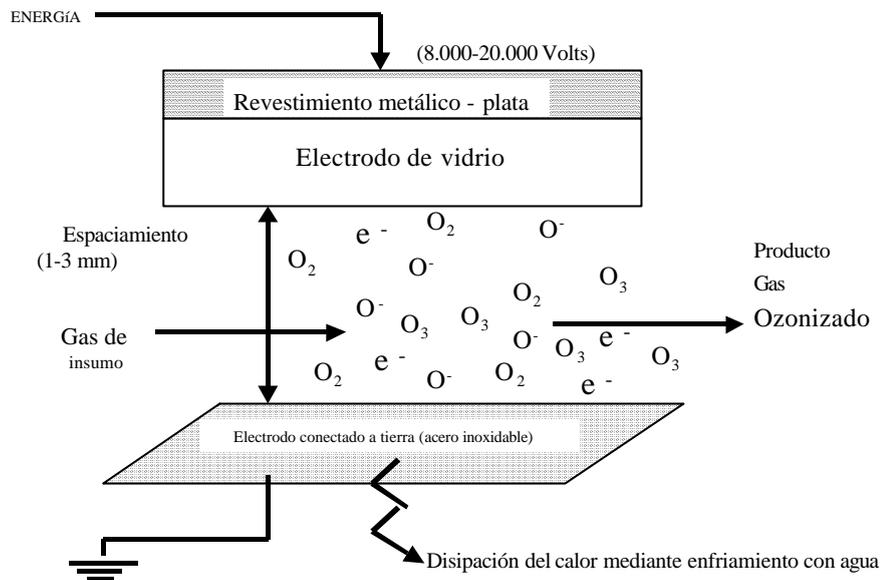


Figura 1. Generador dieléctrico de ozono

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. Se necesita mucha maquinaria y supervisión. El sistema de oxígeno puro usa oxígeno líquido (OXL) y es mucho más sencillo. Sólo se necesita un vaporizador.

2.2 Contactores de ozono

Para que el ozono haga su trabajo de desinfección y oxidación, debe entrar en contacto con el agua y dispersarse de la manera más fina posible. Generalmente, esto se realiza a través de difusores de burbujas finas ubicados en cámaras con deflectores o en un contactor de tipo turbina. Los difusores de cámara con deflectores parecen ser los más comunes. El número de cámaras, su geometría, los sistemas difusores y su operación varían de una planta a otra y dependen de la experiencia de los ingenieros de diseño. La figura 2 muestra el diseño característico para un contactor de cámara con deflectores.

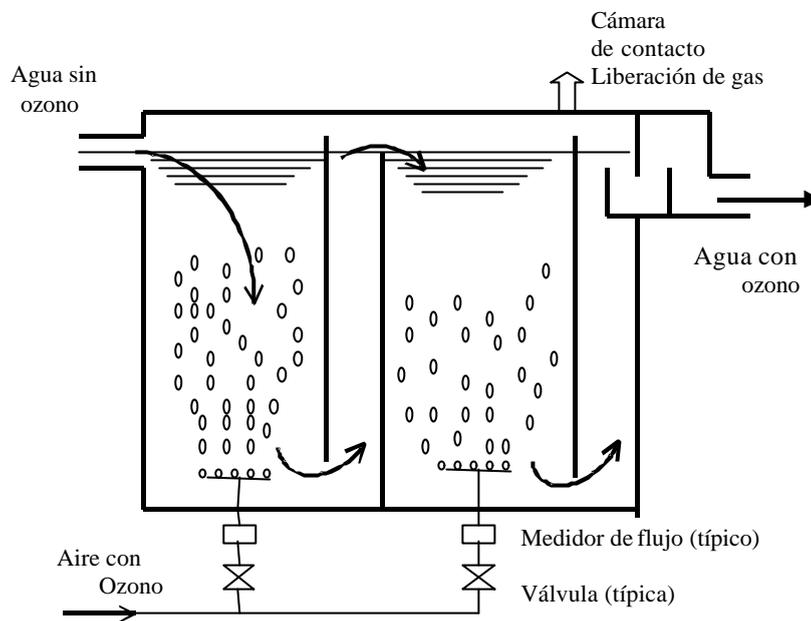


Figura 2. Cámara con deflectores

Un contactor de ozono típico generalmente tiene varios compartimientos 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 el contactor. 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 CT requerido. La última cámara todavía debe tener una concentración de ozono de 0,1 ppm.

La figura 3 muestra un contactor con difusor de turbina que mezcla el ozono con el agua. Luego, las cámaras de contacto establecen el tiempo de contacto.

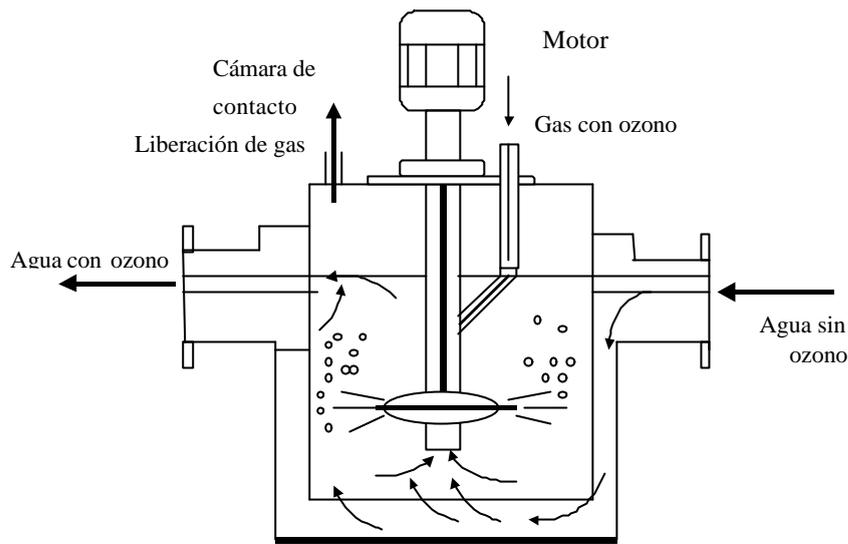


Figura 3. Difusor de turbina

2.3 Destrucción del ozono liberado

El gas liberado por los contactores de ozono generalmente excede el límite establecido por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA), que es de 0,1 ppm, en términos de volumen, por lo que el ozono restante se tiene que reciclar o destruir. El gas liberado pasa primero por un desempañador 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 pcpme (pies cúbicos/minuto estándar) ($3 \text{ m}^3/\text{min}$) del flujo de gas (DeMers,1996).

2.4 Consideraciones de seguridad

El ozono existe naturalmente en el ambiente. Probablemente las mayores concentraciones a corto plazo se producen durante las tormentas, cuando los rayos producen ozono. En el ambiente de oficina, el ozono se detecta cerca de las fotocopiadoras. Los soldadores están expuestos al ozono producido por el arco durante el proceso de soldadura. Asimismo, los residentes que viven en grandes urbes como Denver, Los Angeles, Ciudad de México, Bogotá, Caracas, Sao Paulo, etc., están expuestos a concentraciones de ozono en el rango de 0,5 a 1,0 ppm cuando los gases de escape de los automóviles e industrias reaccionan con la luz solar.

Como el ozono es un oxidante fuerte, reacciona con el tejido humano, en particular en los pulmones, lo que produce dificultades para respirar. Los ojos y la nariz también se ven afectados. La OSHA ha establecido límites para los ambientes de trabajo, los cuales se presentan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Exposición al ozono

Exposición	Límites
Olor detectable tos/irritación	0,01-0,05 ppm
8 min	1 ppm
1 min	4 ppm
límite OSHA 8 h	0,1 ppm
límite OSHA 15 min	0,3 ppm
conc. mortal en < 1 min	10.000 ppm

En una planta de tratamiento de agua, los monitores de ozono supervisan continuamente las concentraciones de ozono en el agua de las celdas del contactor, 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, 1992).

Las paralizaciones de los sistemas de ozono debido a fugas son raros, 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.

3. La planta de tratamiento de agua de Ann Arbor

La planta de tratamiento de agua de Ann Arbor es una planta de ablandamiento con cal que usa agua del río Hurón (85%) y agua de pozo (15%). El agua del río y del pozo es muy dura. Esta dureza se elimina a través de la adición de cal (CaO). Luego del ablandamiento, el agua se filtra con una capa de CAG (carbón activo granular) de un espesor de 40 a 60 cm que se encuentra sobre una capa de 15 cm de arena gruesa con una malla de 0,45 a 0,55 mm. La velocidad de filtración varía de 2 a 7 m/h.

Antes de la instalación del proceso de ozonización, el agua recibía cloraminas dos veces, una en la toma del río y otra justo antes del almacenamiento del agua tratada en el reservorio de la planta de tratamiento. La cloración del agua no se consideró como una opción ya que el contenido orgánico del agua del río es alto y conduciría a altos niveles de THM. Sin embargo, con las cloraminas no se podía garantizar el tiempo de contacto para la inactivación de los virus. En consecuencia, se convirtió la

planta para usar ozono como el desinfectante primario y las cloraminas como desinfectante secundario a fin de mantener un valor residual en el sistema de distribución. En la figura 4 se muestra un diagrama de los procesos de la planta.

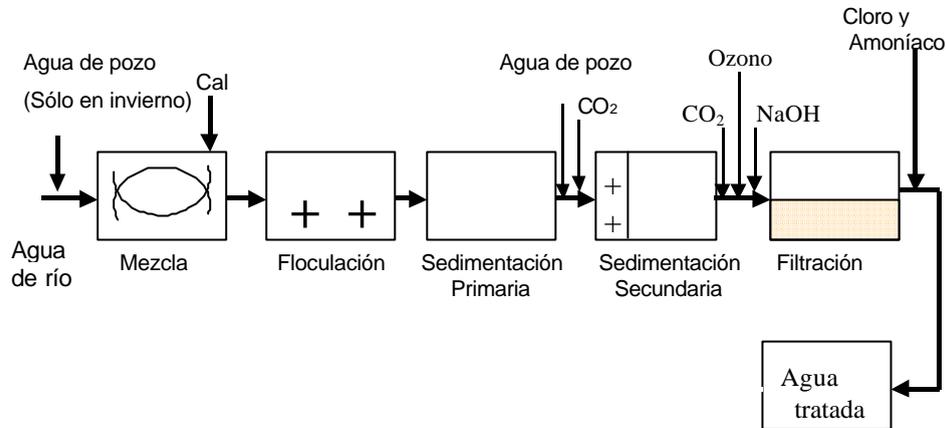


Figura 4. Diagrama de la planta de tratamiento

4. Estudios piloto en la planta de tratamiento de agua de Ann Arbor

No existen dos aguas similares, por ello, es esencial un estudio piloto de la planta para determinar los parámetros adecuados de diseño y operación del sistema de ozonización.

En 1990, la PTA de Ann Arbor realizó un estudio piloto de la planta de ozonización durante las estaciones de agua caliente y fría. La instalación piloto se colocó en un remolque con clima controlado que contenía el equipo de generación de ozono y contactores, filtros piloto y un laboratorio para efectuar análisis de rutina. El objetivo principal del estudio piloto de la planta de ozono era determinar:

- La mejor ubicación para agregar el ozono en el proceso de tratamiento (agua sin tratar, sedimentada o final)
- Dosis requeridas de ozono y costos relativos en diferentes puntos de adición
- Impactos en la calidad del agua y en los subproductos de la desinfección
- Impactos en otros procesos de tratamiento.

Los resultados del estudio piloto fueron sumamente útiles para el diseño final de las instalaciones y ahorraron a la ciudad de Ann Arbor millones de dólares en costos de capital y operación, a cambio de una inversión moderada en el estudio piloto.

Las principales conclusiones del estudio piloto fueron:

- La mejor ubicación para agregar el ozono fue en el agua ablandada y sedimentada, antes de la filtración. Esta ubicación necesitaba aproximadamente la mitad de la dosis de ozono que requeriría el agua sin tratar y formaba menos subproductos (por ejemplo, aldehídos). La ozonización del agua final era ligeramente más económica, pero existía la preocupación de que el material orgánico biodegradable causara problemas de bacterias en el sistema de distribución. Al agregar el ozono al agua sedimentada, también se podría extraer parte del material biodegradable mediante filtros con CAG, especialmente en la temporada de agua caliente.
- La dosis de ozono requerida para el agua sedimentada fue de 4 mg/l. Esta cumplía todos los requisitos de desinfección, mejoraba el sabor del agua y no creaba subproductos excesivos. El ozono como desinfectante primario y las cloraminas como desinfectante secundario produjeron niveles muy bajos de subproductos de la desinfección (es decir, THM, AHA) y el CAG redujo los niveles de los compuestos orgánicos biodegradables. La ozonización con un pH de 8,0 aparecía como la alternativa más económica.
- La ozonización no tuvo repercusiones adversas sobre el proceso de filtración. Los tiempos de operación del filtro no cambiaron significativamente así como tampoco los requisitos de remoción de partículas y retrolavado.

5. Reconversión de la planta de tratamiento de agua

En 1992 comenzó el diseño final de las instalaciones de ozono. Un punto importante fue la ubicación física de las instalaciones de ozono en la planta, la que se encuentra sumamente congestionada por las viviendas residenciales que la rodean. Una solución fue construir los contactores de ozono entre dos clarificadores existentes con sólo algunos pies de espacio libre en cada lado. El generador de ozono se construyó en la parte superior del contactor porque literalmente no había otro espacio disponible. Se tomaron medidas especiales para sellar la parte superior de los contactores con el fin de evitar fugas en la planta.

La hidráulica de la planta fue otro tema importante del diseño. La ubicación elegida tenía tuberías en los alrededores, por ello, las tuberías de entrada y salida del contactor fueron relativamente cortas. Sin embargo, al no existir carga suficiente entre los clarificadores y los filtros para el proceso de ozonización, se construyó una estación de bombeo de baja capacidad justo antes de los contactores de ozono, para lo que se usó bombas sumergibles. Esto proporcionó la carga suficiente para bombear a los contactores de ozono y para generar flujo por gravedad al resto de la planta.

Se eligió el oxígeno líquido (OXL) como el gas de insumo por las siguientes razones:

- Menor costo global con los nuevos generadores de ozono de alta concentración.
- Menos requerimiento de espacio en comparación con un sistema de adsorción neumático o de adsorción por oscilación de presión (AOP).

- Operación y mantenimiento simples.

Los contactores de ozono constan de cuatro trenes paralelos con un tiempo de contacto de ocho minutos y un flujo máximo de diseño de 200.000 m³/día (50 mgd). Cada tren tiene siete celdas. Se puede añadir el ozono a través de difusores de burbujas finas en dos celdas o a través de un sistema eductor en línea en la primera celda. Los contactores también tienen capacidad para reciclar el ozono liberado a través del sistema eductor. Las pruebas con el trazador hidráulico indican que los contactores se acercan a 80% del gasto tipo pistón. Un factor principal es la placa deflectora colocada en la primera celda para la distribución homogénea del flujo.

Hay cuatro generadores de ozono que pueden producir 250 kg/día (550 ppd) de ozono. El sistema de enfriamiento del agua es un sistema de circuito cerrado que cuenta con un enfriador para el agua caliente. Los destructores del gas de ozono liberado son térmicos/catalíticos. En 1996 se completó la planta de ozono y ha estado en funcionamiento durante dos años. La instalación satisface los criterios de diseño y la calidad del agua ha mejorado significativamente.

6. Estudio de operación y subproductos

Luego de concluir las adiciones a la planta y después de varios meses de uso, se monitorearon minuciosamente dos períodos de operación. Uno durante febrero y marzo de 1997 con una temperatura del agua de 10 °C y el otro de agosto a septiembre de 1997 con una temperatura promedio de 20 °C. Los períodos se llamarán frío y caliente, respectivamente.

Los valores CT requeridos para la inactivación de virus fueron de 0,5 mg/l*min durante el período frío y 0,25 mg/l*min durante el período caliente. Los valores CT efectivamente logrados fueron 2 mg/l*min durante el período frío y 0,5mg/l*min durante el período caliente.

MICROORGANISMOS: Se monitoreó el agua sin tratar para detectar *Giardia*, *Cryptosporidium* y virus entéricos. Si bien en el agua sin tratar se encontraron algunos en muy bajas concentraciones, en el agua tratada no se encontró ninguno.

BROMUROS: Se monitorearon los niveles de bromuro tanto durante las estaciones de agua fría como de agua caliente. Las concentraciones promedio estuvieron alrededor de 80 µg/L y no hubo diferencia significativa entre las estaciones.

BROMATOS: Se detectaron bromatos durante ambas estaciones, generalmente alrededor de 5 µg/L, muy por debajo del límite actualmente propuesto de 10 µg/L

ALDEHÍDOS: Se formaron aldehídos durante el proceso de ozonización; el compuesto principal fue el formaldehído. Las concentraciones variaron de 20 a 40 $\mu\text{g/L}$. Fueron extraídos parcialmente mediante filtración con CAG. Durante la estación fría, las concentraciones en el agua tratada estuvieron alrededor de 20 $\mu\text{g/L}$ y durante la estación caliente alrededor de 10 $\mu\text{g/L}$. Esto indica que cuando la temperatura es más caliente, los filtros con CAG son biológicamente más activos.

AHA6, NHA, TTHM: Se monitorearon y encontraron ácidos haloacéticos, nitrilos haloacéticos y trihalometanos totales en concentraciones sumamente bajas. La figura 5 indica que el valor del pH del agua parece tener un efecto tanto en los THM como en los AHA.

TTHM y AHA6 en el agua tratada Efectos del pH a 10°C

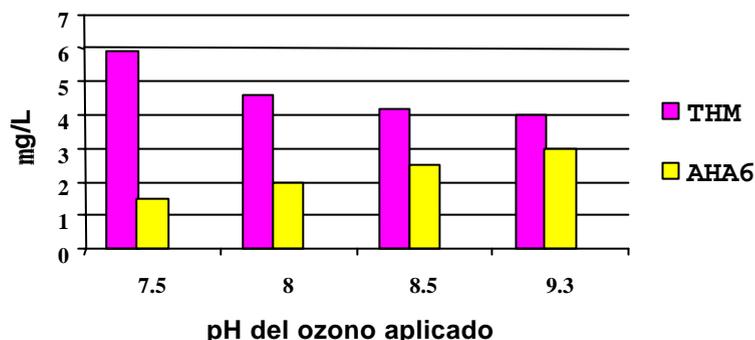


Figura 5. THM y AHA6 en el agua tratada

El valor promedio de 5 $\mu\text{g/L}$ de TTHM y el valor promedio de 2 $\mu\text{g/L}$ de AHA6 muestran que los procesos se encuentran bajo control. El valor de los NHA (nitrilos haloacéticos) fue mucho menor, en general por debajo de 1 $\mu\text{g/L}$.

COT: El carbono orgánico total principalmente se extrajo principalmente en la etapa de ablandamiento. El agua del río Hurón es bastante dura (300 mg/l de CaCO_3) y con la adición de cal se ablanda aproximadamente a 130 mg/l. El COT característico en el agua del río se encuentra entre 6 y 7 mg/l y después del ablandamiento se redujo a cerca de 3 mg/l. El proceso de ozonización reduce una cantidad pequeña de COT, generalmente alrededor de cuatro por ciento. No hay una diferencia significativa entre la estación de agua fría y caliente. La filtración con CAG logra en promedio alrededor de 15 por ciento de remoción del COT, con una remoción de 20 por ciento durante el período caliente y una reducción de 10 por ciento durante el período frío. Por lo tanto, toda la planta elimina cerca de 60 por ciento del COT. En la figura 6 se muestra el rango y el promedio de la remoción del COT.

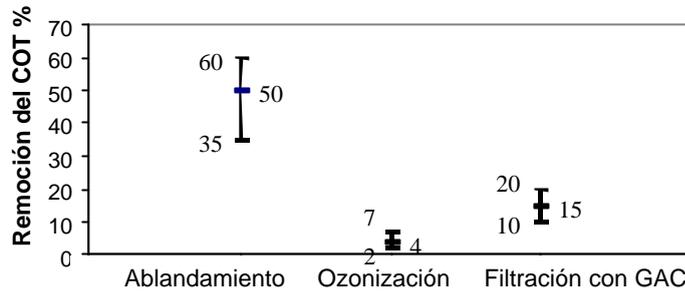


Figura 6. Remoción del COT mediante procesos de planta

COA: El carbono orgánico asimilable es una preocupación, ya que puede estimular nuevamente el crecimiento de bacterias en el sistema de distribución. La figura 7 muestra el aumento del COA durante el proceso de ozonización. Mientras el COA promedio en el agua, luego del ablandamiento, es aproximadamente 50 $\mu\text{g/L}$, después de la ozonización esa cantidad es tres veces mayor. Contrariamente a las predicciones de que el recuento de bacterias en el sistema de distribución debería elevarse, esto no ha sucedido ni siquiera durante la estación caliente.

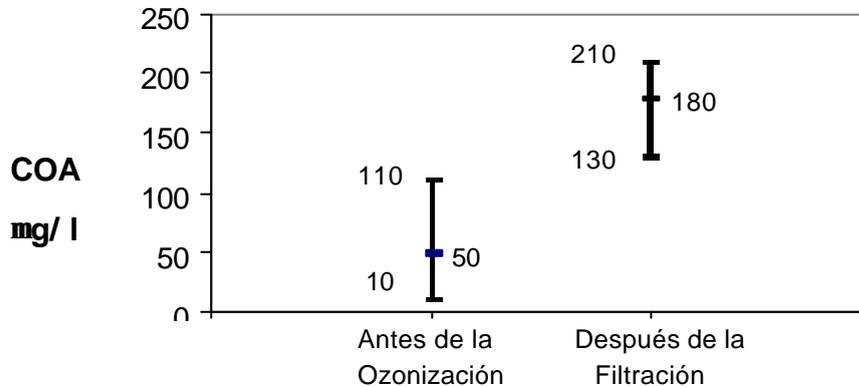


Figura 7. Aumento del COA debido a la ozonización

COSTOS: Los gráficos de las figuras 8 y 9 muestran los costos durante la estación fría y caliente y los efectos del pH. Aproximadamente, los costos durante la estación fría son tres veces mayores que durante la estación caliente. Esto se puede explicar por el hecho de que durante la estación fría se usó una concentración de ozono tres veces mayor para satisfacer los requisitos en cuanto a los valores CT.

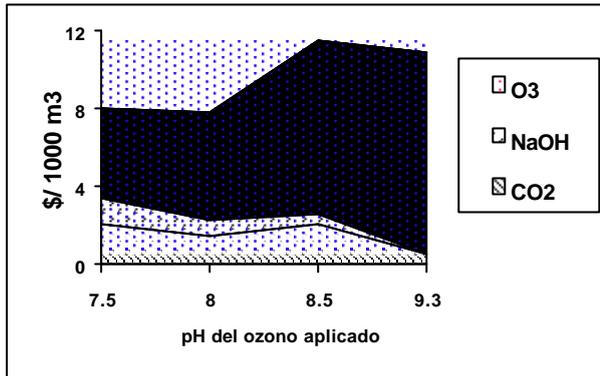


Figura 8. Costos de los compuestos Químicos vs. efectos del pH a 10°C

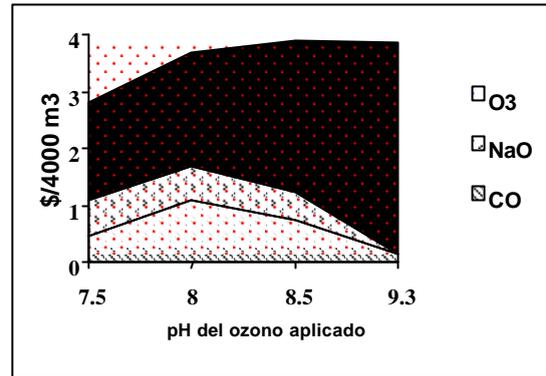


Figura 9. Costos de los compuestos químicos vs. efectos del pH a 20°C

7. Conclusiones

Los consumidores de agua potable de Ann Arbor están muy complacidos con la calidad del agua. Las tarifas del agua han subido, pero no al punto que los consumidores vigilen los medidores de agua. En efecto, si se considera el costo del agua en comparación con otros servicios como el gas, la electricidad o el teléfono, todavía el precio es bajo.

Al usar el ozono como desinfectante principal, la calidad del agua potable ha mejorado enormemente y cumplirá cualquier reglamento presente y futuro a pesar que la fuente principal de agua contiene gran cantidad de compuestos orgánicos. Se generan subproductos, pero en concentraciones tan bajas que no representan una preocupación para la salud pública.

Si bien el ozono es hoy lo que se puede llamar un desinfectante “huérfano” debido a su reducido uso en el mundo, se puede predecir con toda seguridad que su uso se incrementará en el futuro.

8. Referencias

DeMers, L.D. et al., Ozone System Energy Optimization Handbook, AWWA Research Foundation, 1996, ISBN 0-9648877-1-1.

George, D.B. et al., Case Studies of Modified Disinfection Practices for Trihalomethane Control, AWWA Research Foundation, 1990, ISBN 0-89867-515-4.

Masschelein, W. J., Ozonation Manual for Water and Wastewater Treatment, John Wiley & sons, 1982, ISBN 0-471-10198-2.

Rakness, K.L. et al., Ozone System Fundamentals for Drinking Water, Opflow, Amer. Water Works Assoc., Vol 2, No 7, julio de 1996.

Reiff, F. y V. M. Witt, Guidelines for the Selection and Application of Disinfection Technologies for Small Towns and Rural Communities in Latin America and the Caribbean, PAHO Technical Series No 30, Washington, D.C., 1992.

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

USEPA, Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfection requirements for Public Water Systems Using Surface Water Sources, 1989.

Referencia adicional:

International Ozone Association: www.int-ozone-assoc.org