

DIÓXIDO DE CLORO

Original: inglés

R.A. Deininger

A. Ancheta

A. Ziegler

Escuela de Salud Pública
The University of Michigan
Ann Arbor, Michigan, EUA

RESUMEN

La aceptación del dióxido de cloro como oxidante y desinfectante del agua potable en Estados Unidos ha crecido significativamente durante los 20 últimos años; varios cientos de plantas usan actualmente dióxido de cloro. En Europa, el uso del dióxido de cloro está generalizado; en Italia, más de 30% de las plantas de tratamiento de agua utilizan dióxido de cloro y en Alemania más de 10%. La ventaja principal del dióxido de cloro es que mejora el gusto y el olor, y reduce la formación de subproductos orgánicos, como los trihalometanos (THM). Además, el dióxido de cloro resulta efectivo en un amplio rango de valores de pH. Se espera que el uso de dióxido de cloro para desinfectar aguas potables siga aumentando en los Estados Unidos.

Este documento describe el dióxido de cloro como un desinfectante alternativo efectivo para sistemas de agua potable. Se describen las propiedades y características del dióxido de cloro con respecto a su eficacia, cinética, pH, reacción con metales, subproductos y técnicas analíticas. Se describen los parámetros incluidos en la generación del dióxido de cloro y se analiza el estado de la reglamentación del dióxido de cloro y los subproductos de la desinfección.

1. Introducción

1.1 *Desinfección primaria y secundaria*

En los Estados Unidos, el dióxido de cloro (ClO_2) se usó por primera vez como desinfectante del agua potable hace 50 años. El primer uso reportado fue en 1944 en una planta de tratamiento de agua en Niagara Falls, Nueva York (Aieta y Berg, 1986). Desde entonces, el uso del dióxido de cloro se ha ampliado a otras aplicaciones, incluido el tratamiento del agua para usos industriales y para el procesamiento de alimentos. El cloro, las cloraminas, el dióxido de cloro y el ozono son, actualmente, los desinfectantes más usados en sistemas municipales de

agua potable. Según una encuesta reciente de la *American Water Works Association* (AWWA–Skadsen, 1998), el dióxido de cloro ocupa un alejado tercer lugar en los Estados Unidos. Los siguientes cuadros examinan el dióxido de cloro como un desinfectante primario y secundario. Los datos demuestran que el dióxido de cloro se usa principalmente como desinfectante y oxidante primario.

Cuadro 1. Uso del dióxido de cloro como desinfectante primario en los Estados Unidos

Desinfectante	Número de sistemas	(%) Población
Dióxido de cloro	760	10

Cuadro 2. Uso del dióxido de cloro como desinfectante secundario en los Estados Unidos

Desinfectante	Número de sistemas	Porcentaje (%)
Cloro	592	64
Monocloramina	174	19
Dióxido de cloro	9	1
Ningún desinfectante	150	16

En Europa, el ClO_2 se usa en mayor medida como desinfectante secundario. Una encuesta en las plantas de tratamiento de agua de Alemania (cuadro 3) refleja que la mayoría de plantas desinfectan con hipoclorito de sodio, seguido de cloro y luego del dióxido de cloro (Haberer, 1994a).

Cuadro 3. Uso de desinfectantes en Alemania

Desinfectante	Número de plantas	Porcentaje (redondeado)
Hipoclorito de sodio	754	53
Cloro	368	27
Dióxido de cloro	133	9
Otros (ozono, plata, cloraminas, combinaciones)	179	11
Total	1.434	100

Las concentraciones típicas de THM estuvieron entre 1 y 4 $\mu\text{g/l}$ y en menos de 10% de las plantas se excedió el valor guía de 10 $\mu\text{g/l}$.

Cuadro 4. Concentraciones medias de THM en Alemania y Estados Unidos

País	Desinfectante	Año	Número de análisis	THM medio (mg/l)
Alemania	Todos los productos de cloro	1991	700	1,5
	Cloro libre	1991	239	3,0
	Hipoclorito de sodio	1991	351	1,0
	Dióxido de cloro	1991	75	0,5
Estados Unidos	NORS ¹	1975	80	41
	NOMS ²	1977	113	45
	AWWARF ³	1987	727	55
	USEPA ⁴ //CDHS ⁵	1988	35	40

1 NORS = National Organics Reconnaissance Survey (Estudio Nacional de Reconocimiento de Compuestos Orgánicos)

2 NOMS = National Organic Monitoring Survey (Encuesta Nacional de Monitoreo de Compuestos Orgánicos)

3 AWWARF = AWWA Research Foundation (Fundación de Investigación de la AWWA)

4 USEPA = US Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)

5 CDHS = State of California Department of Health Services (Departamento de Servicios de Salud del Estado de California)

Es interesante señalar que a lo largo del río Rin en Alemania, 13 de las 16 principales plantas de tratamiento del agua usan dióxido de cloro (Haberer, 1994b). La preferencia por el dióxido de cloro tiene relación con la baja formación de cloroformo en presencia de precursores orgánicos. Esto es comprensible si se consideran las normas actuales respecto a los trihalometanos (THM) en Europa (cuadro 5).

Cuadro 5. Reglamentos actuales para THM

País	TTHM (µg/L)	Cloroformo (µg/L)	Diclorobromometano (µg/L)
	MCA	MCA	MCA
Austria	30		
Bélgica	100		
Canadá	350		
Finlandia		200	60
Francia		30	
Alemania	10		
Gran Bretaña	100		
Irlanda	100		
Luxemburgo	50		
Noruega	100		
Suecia	50		
Suiza	25		
Estados Unidos	100		
Directiva de la CEE (1995)		40	15

* MCA: Máxima concentración admisible

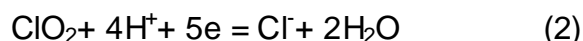
Las empresas de agua en los Estados Unidos siguen mejorando sus prácticas de desinfección para brindar una protección microbiana adecuada, a la vez que minimizan los subproductos de la desinfección. Las enmiendas a la Ley de Agua Potable Segura incluyen la promulgación de la Norma para Desinfectantes/ Subproductos de Desinfectantes (D/SPD). Las normas para D/SPD se implementarán en dos fases, fase I y fase II. Se tiene previsto que la fase I entre en vigor en noviembre de 1998 para sistemas de aguas superficiales que sirvan a más de 10.000 personas. La fase II se promulgará en mayo de 2002 y considerará una mayor cantidad de datos científicos y resultados de aplicaciones e investigaciones. El cuadro 6 refleja los niveles propuestos para los desinfectantes y sus subproductos.

Cuadro 6. Niveles máximos propuestos para los contaminantes en los Estados Unidos en el futuro

		Fase I	Fase II
Desinfectante	Cloro Cloramina Dióxido de cloro	4 ppm 4 ppm 0,8 ppm	
Subproductos	Trihalometanos totales Ácidos haloacéticos (HAAs) Bromato Clorito	80 ppb 60 ppb 10 ppb 1 ppm	40 ppb

2. Propiedades del dióxido de cloro

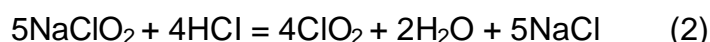
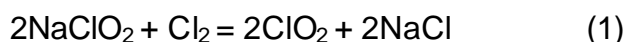
El dióxido de cloro es un gas de color verde amarillento con un peso molecular de 67,46. Es estable y sumamente soluble en soluciones acuosas de hasta 20 g/l. Además de sus propiedades biocidas, el dióxido de cloro mejora la calidad del agua potable, es decir, neutraliza olores, remueve el color y oxida al hierro y al manganeso. Una de las propiedades más interesantes del dióxido de cloro es su eficacia biocida en un amplio rango de pH (3 a 9). El dióxido de cloro es sensible a la luz ultravioleta (Junli y otros, 1997) y su capacidad de oxidación se incrementa con la acidez.



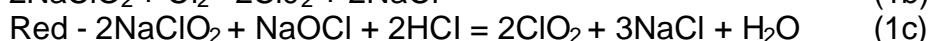
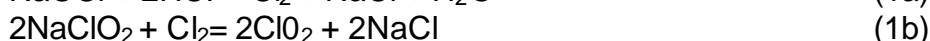
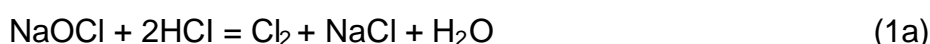
Debido a que el dióxido de cloro existe como un gas inestable, el producto no puede comprimirse ni distribuirse en cilindros como el cloro gaseoso. El dióxido de cloro debe producirse *in situ* mediante el uso de un generador mecánico. Comúnmente se genera mediante la reacción de clorito de sodio con cloro gaseoso (sistema de 2 compuestos químicos) o mediante la reacción de clorito de

sodio con hipoclorito de sodio y ácido clorhídrico (sistema de 3 compuestos químicos).

Proceso de generación del dióxido de cloro con dos compuestos químicos



Proceso de generación del dióxido de cloro con tres compuestos químicos



El dióxido de cloro tiene varios efectos físicoquímicos sobre los constituyentes que generalmente se encuentran en el agua. Estos efectos se resumen en el cuadro 7.

Cuadro 7. Efectos del ClO_2 en el tratamiento del agua potable

Sustancia	Reacción
Sustancias orgánicas naturales y sintéticas seleccionadas	Pueden reaccionar y formar clorito
Hierro y manganeso	Oxidación
Color	Remoción
THMFP	Reducción
Sustancias orgánicas	Oxidación
Fenoles	Oxidación a quinonas

3. Uso en el tratamiento del agua

El dióxido de cloro es muy útil para el tratamiento del agua potable. Mientras los desinfectantes de cloro reaccionan con diversas sustancias mediante la oxidación y sustitución electrofílica, el dióxido de cloro sólo reacciona mediante la oxidación (Aieta y Berg, 1986). Como resultado de ello, el uso de dióxido de cloro puede disminuir la formación de THM en el agua tratada. Cuando se producen niveles más altos de THM en las aguas tratadas con dióxido de cloro, esto a menudo se debe a problemas en los generadores de dióxido de cloro, generalmente un exceso en el suministro de cloro (Anderson y otros, 1982).

Con el tiempo se produce cloroformo en los sistemas de distribución, donde el agua puede permanecer muchos días (figura 1).

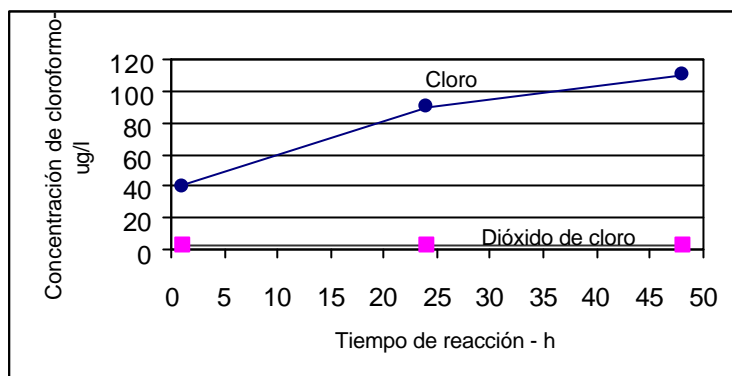


Figura 1. Producción de cloroformo por cloro y por dióxido de cloro en agua con 5 mg/l de ácido húmico (Symons, 1981)

El dióxido de cloro produce subproductos en forma de cloritos y cloratos. Los cloritos y cloratos oxidan la hemoglobina y el clorito es un agente hemolítico (Anderson y otros, 1982). El máximo nivel propuesto de contaminante (MNPC) en los Estados Unidos para el clorito es 1,0 mg/l, mientras que el ion clorato no está reglamentado actualmente. Los datos de las plantas de tratamiento de agua de Alemania indican que la concentración promedio de clorito está por debajo de 200 µg/l en Alemania (Haberer, 1994).

El cuadro 8 presenta ejemplos de los límites para contaminantes vigentes en Europa para el caso del dióxido de cloro y el hipoclorito de sodio.

Cuadro 8. Ejemplos de reglamentación europea para NaClO_2 y ClO_2

País	NaClO_2	ClO_2	Cantidad máxima admisible (mg/l)	Concentración residual al final del tratamiento
Bélgica	X		5	
Alemania		X	0,4	min = 0,05 mg/l, máximo = 0,2 mg/l
Gran Bretaña				Máximo = 0,5 mg/l como suma de $\text{ClO}_2 + \text{NaClO}_2 + \text{NaClO}_3$
España	X		30	
Suecia		X	0,7	

4. Modos de acción

4.1 Acción microbicida

El dióxido de cloro es un desinfectante más potente que el cloro y la cloramina. El ozono tiene mayores efectos microbicidas, pero una capacidad de desinfección residual limitada. La investigación reciente en los Estados Unidos y Canadá demuestra que el dióxido de cloro destruye enterovirus, *E. coli* y amebas y es efectivo contra los quistes de *Cryptosporidium* (Finch y otros, 1997).

El dióxido de cloro existe en el agua como ClO_2 (poca o ninguna disociación) y, por lo tanto, puede pasar a través de las membranas celulares de las bacterias y destruirlas (Junli y otros, 1997b). El efecto que tiene sobre los virus incluye su adsorción y penetración en la capa proteica de la cápside viral y su reacción con el RNA del virus. Como resultado, se daña la capacidad genética del virus (Junli y otros, 1997a). En comparación con el cloro, el dióxido de cloro puede ser más efectivo como desinfectante debido a que en el agua existe cloro en forma de HOCl u OCl^- y, en consecuencia, las paredes de las células bacterianas se cargan negativamente y repelen estos compuestos, lo que genera una menor penetración y absorción del desinfectante a través de las membranas.

El cuadro 9 muestra la eficacia biocida, la estabilidad y el efecto del pH para los cuatro desinfectantes más comunes.

Cuadro 9. Eficacia biocida, estabilidad y efecto del pH

Desinfectante	Eficacia biocida	Estabilidad	Efecto del pH en la eficacia (pH=6-9)
Ozono	1	4	Poca influencia
Dióxido de cloro	2	2	Se incrementa ligeramente al aumentar el pH
Cloro	3	3	Disminuye considerablemente al aumentar el pH
Cloraminas	4	1	Poca influencia

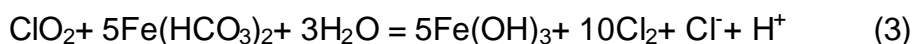
El cuadro 9 demuestra que el ozono, con un potencial de oxidación más fuerte, es el menos estable de los cuatro compuestos. También se ha observado que las cloraminas pueden tener la menor efectividad biocida, pero presentan un efecto residual más prolongado.

La selección de un desinfectante o combinación de desinfectantes debe considerar cómo equilibrar de la mejor manera los requerimientos de cada planta de tratamiento de agua y sistema de distribución.

4.2 Acción oxidante

La acción oxidante del dióxido de cloro a menudo mejora el gusto, olor y color del agua. El dióxido de cloro reacciona en el agua con compuestos fenólicos, sustancias húmicas, sustancias orgánicas e iones metálicos.

Por ejemplo, el dióxido de cloro oxida el hierro, el cual se precipita fuera del agua como hidróxido de hierro. Luego, el precipitado se remueve fácilmente mediante filtración.



El dióxido de cloro reacciona con sustancias orgánicas, generalmente por oxidación, y forma pocos compuestos orgánicos clorados. El cloro libre, en presencia de precursores orgánicos, puede formar trihalometanos (THM) y otros compuestos halogenados (Aieta y Berg, 1986).

Los compuestos fenólicos presentes en el agua potable se deben principalmente a la contaminación proveniente de fuentes industriales. Estas moléculas, aun cuando están en concentraciones de microgramos por litro, dan un olor y sabor desagradables. El dióxido de cloro reacciona rápidamente con los fenoles. Esta reacción puede variar en diferentes sistemas y ocasionar:

- 1) La formación de quinonas o cloroquinonas.
- 2) La ruptura del anillo aromático y la formación de derivados alifáticos.

El dióxido de cloro oxida al ácido húmico, un precursor de los THM, con lo que minimiza la formación de compuestos halogenados en el tratamiento secundario (Aieta y Berg, 1986).

5. Problemas con el dióxido de cloro

La mayoría de los problemas asociados con el dióxido de cloro se centran alrededor de dos áreas:

- 1) El equipo de generación de dióxido de cloro.

No existe ningún estándar industrial para el rendimiento de los generadores de dióxido de cloro. La eficiencia del generador se define no sólo en función de la conversión de clorito de sodio en dióxido de cloro, sino también en función de la generación de subproductos tales como ion clorato, cloro libre y clorito sobrante. Cuando el generador no funciona adecuadamente, estos subproductos pueden salir del generador de dióxido de cloro en cantidades excesivas y disminuir los resultados esperados. Además, el rendimiento deficiente de los generadores dará como resultado costos de operación superiores a los deseados. Los generadores

modernos de dióxido de cloro son capaces de funcionar sistemáticamente en los niveles deseados cuando se les opera adecuadamente.

2) Análisis adecuado del dióxido de cloro y sus subproductos.

Dado que las reacciones del dióxido de cloro incluyen la formación de ion clorito como subproducto, un equipo de pruebas sencillo no puede proporcionar los datos analíticos requeridos. Se requiere el análisis del producto del generador de dióxido de cloro y del agua tratada para cuantificar con precisión la dosificación y los subproductos. Es necesario diferenciar específicamente el dióxido de cloro, el ion clorito y el cloro libre en el generador para determinar su rendimiento y eficiencia. El método recomendado para determinar el rendimiento y eficiencia del generador es la titulación amperométrica en cuatro pasos. Existen equipos de prueba para concentraciones de menos de 5 mg/l en el agua tratada, pero tienen limitaciones e interferencias.

6. Comparación entre desinfectantes

6.1 Comparación de costos

El siguiente cuadro (Myers, 1990) compara el costo de tratar agua con diferentes métodos. En la mayoría de los casos, el tratamiento con dióxido de cloro es más costoso que con cloro, pero a menudo es menos costoso que con ozono.

Existe poca información bibliográfica sobre costos comparativos para diversas opciones de desinfección en plantas de tratamiento de agua. El cuadro 10 resume la información (1980) en relación con los costos de capital y los costos de operación y mantenimiento de varios tipos de desinfectantes. Los datos recientes presentados a la USEPA por el panel de Fabricantes de Dióxido de Cloro indican que los datos presentados en la tabla aún tienen valor cualitativo. Como era de esperarse, el costo por galón de agua tratada es significativamente mayor en los sistemas más pequeños.

Cuadro 10. Comparación de costos de los desinfectantes
(Dólares por galón)

COSTOS	CAPACIDAD DEL SISTEMA				
	1 mgd	5 mgd	10 mgd	100 mgd	150 mgd
COSTO DE CAPITAL (c/1000 gal)					
Cloración (2mg/l)	2,19	0,88	0,62	0,26	0,24
Ozono a partir del aire (1mg/l)	2,90	1,36	1,11	0,76	0,73
Ozono a partir de oxígeno (1 mg/l)	4,46	1,50	1,08	0,61	0,58
Dióxido de cloro (1 mg/l)	1,9	0,76	0,51	0,22	0,20
Cloramina (1mg/l)	1,70	0,62	0,42	0,17	0,15
COSTO DE OPERACIÓN (c/1000 gal)					
Cloración (2mg/l)	1,06	0,56	0,46	0,32	0,31
Ozono a partir del aire (1mg/l)	2,785	1,08	0,77	0,40	0,38
Ozono a partir de oxígeno (1 mg/l)	2,87	1,17	0,88	0,52	0,49
Dióxido de cloro (1 mg/l)	1,55	1,18	1,12	1,03	1,02
Cloramina (1mg/l)	0,63	0,25	0,19	0,10	0,10
COSTO TOTAL (c/1000 gal)					
Cloración (2mg/l)	3,25	1,44	1,08	0,58	0,55
Ozono a partir del aire (1mg/l)	5,68	2,44	1,88	1,16	1,11
Ozono a partir de ozono (1 mg/l)	7,33	2,67	1,96	1,13	1,07
Dióxido de cloro (1 mg/l)	3,45	1,94	1,63	1,25	1,22
Cloramina (1mg/l)	2,33	0,87	0,61	0,27	0,25

6.2 Comparación de valores CT de los desinfectantes

El cuadro 11 muestra el tiempo (T) necesario para que una concentración (C) de desinfectante residual torne inactivo a un microorganismo. Generalmente, la concentración se mide en mg/l y el tiempo se mide en minutos.

Cuadro 11. Valores CT

Microorganismo	Cloro (pH 6-7)	Cloramina (pH 8-9)	Dióxido de cloro (pH 6-7)	Ozono (pH 6-7)
<i>E. coli</i>	0,034-0,05	95-180	0,4-0,75	0,02
Poliomielitis 1	1,1-2,5	768-3740	0,2-6,7	0,1-0,2
Rotavirus	0,01-0,05	3806-6476	0,2-2,1	0,006-0,06
Fago f2	0,08-0,18	Nd	Nd	Nd
Quistes de <i>G. lamblia</i>	47-150	2200 *	26 *	0,5-0,6
Quistes de <i>G. Muris</i>	30-630	1400	7,2-18,5	1,8-2,0

* 99,99% de inactivación a un pH = 6-9; 90% de inactivación a un pH = 7 y 25 °C; Nd: no hay datos

Los desinfectantes más efectivos son aquellos que tienen los valores CT más bajos. El cuadro mostrado indica que el desinfectante más efectivo es el ozono. El dióxido de cloro se considera el segundo desinfectante más efectivo.

6.3 Comparación de los desinfectantes para *Giardia* y *Cryptosporidium*

El siguiente cuadro muestra la efectividad de los desinfectantes sobre microorganismos problemáticos, como el *Cryptosporidium*.

Cuadro 12. Valores CT para microorganismos problemáticos (mg/l*min)

Microorganismo	Cloro (pH 6-7)	Cloramina (pH 8-9)	Dióxido de cloro (pH 6-7)	Ozono (pH 6-7)
<i>Giardia</i> 0,5 log, de inactivación, pH 6- 9, 5 °C	16-47	365	4,3	0,3
<i>Cryptosporidium</i> , pH 7, 25 °C	7,200 1 log inactivación	7,200 2 log inactivación	78 1 log inactivación	5-10 2 log inactivación

Este cuadro muestra que el ozono es el desinfectante más potente; en segundo lugar está el dióxido de cloro.

7. Resumen de las ventajas y desventajas del dióxido de cloro

7.1 Ventajas

- Efectivo contra muchos microorganismos y más potente que el cloro en un tiempo de contacto corto.
- Mayor poder de oxidación, lo que contribuye a la remoción de olor, color y mal sabor.
- Reduce/limita la formación de trihalometanos.

7.2 Desventajas

- Es más caro que el cloro
- Se forman subproductos de clorito y clorato
- Debe generarse en el lugar.

8. Conclusión

El dióxido de cloro es más costoso que el cloro pero es un excelente desinfectante y presenta mayor estabilidad en un amplio rango de valores de pH. El dióxido de cloro proporciona desinfección residual en el sistema de distribución pero a menudo se usa como un desinfectante primario. En los Estados Unidos, cuando el dióxido de cloro se usa como desinfectante primario, frecuentemente se aplica cloro como desinfectante secundario para asegurar una protección microbiana adicional en el sistema de distribución. La combinación de dióxido de cloro con otras tecnologías de desinfección representa un medio económico de reducir los subproductos de la desinfección, a la vez que brinda una adecuada protección microbiana en el sistema de distribución.

En los Estados Unidos, la meta principal es proporcionar protección microbiana adecuada en los sistemas de agua potable y a la vez minimizar los subproductos indeseables de la desinfección. Para alcanzar este objetivo, se debe aplicar un criterio equilibrado al seleccionar las diferentes opciones en cuanto a tecnologías de desinfección.

9. Referencias

Aieta, E.M. and Berg, J.D. A review of chlorine dioxide in drinking water treatment. *J. Amer. Water Works Assoc.*, 1986; 78, (6): 62-72.

Anderson, A.C., Reimers, R.S. and deKernion, P. A brief review of the current status of alternatives to chlorine disinfection of water. *American Journal of Public Health*, 1982; 72, (11): 1290-1294.

Dietrich, A.M, Orr, M.P., Gallagher, D.L. and Hoehn, R.C. Tastes and odors associated with chlorine dioxide. *J. Amer. Water Works Assoc.*, 1992; 84, (6): 82-88.

Haberer, K. Survey of Disinfectants used in German water works. *Wasser-Abwasser*, 1994a; 135, (7): 409-417.

Haberer, K. Trinkwassergewinnung am Rhein. *Wasser & Boden*, 1994b; 3: 20-27
Internet: CLO₂ Fact Sheet: <http://www.clo2.com/wtupgrade/disinfection.html>

Junli, H., Li, W., Nenqi, R., Li, L.X., Fun, S.R. and Guanle, Y. Disinfection effect of chlorine dioxide on viruses, algae, and animal planktons in water. *Wat. Res.*, 1997; 31, (3): 455-460.

Junli, H., Li, W., Nenqi, R., Fang, M., and Li, J. Disinfection effect of chlorine dioxide on bacteria in water. *Wat. Res.*, 1997; 31, (3): 607-613.

Myers, A. Evaluating alternative disinfectants for THM control in small systems. *J. Amer. Water Works Assoc*, 1990; 82, (6): 77-84.

Peeters, J. E., Mazas, E.A., Masschelein, W.J., Martinez de Maturana, I.V. and Debacker, E. Effect of disinfection of drinking water with ozone or chlorine dioxide on survival of cryptosporidium parvum oocysts. *Applied and Environmental Microbiology*, 1989; 55, (6): 1519-1522.

Skadsen, J. Ann Arbor Water Treatment Plant, 1998, comunicación personal.

Symons, J.M. et al. Treatment techniques for controlling trihalomethanes in drinking water. EPA 600/2-81, MERL, EPA, 1981; Cincinnati, Ohio.

10. Referencias adicionales

Tres buenos libros de referencia sobre el dióxido de cloro son:

Gates, D. The Chlorine Dioxide Handbook, 1998, American Water Works Association, ISBN 0-89867-942-7.

Masschelein, W.J. Chlorine Dioxide, 1979, Ann Arbor Science Publishers, ISBN 0-250-40224-6.

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

El primer libro, segundo volumen de la serie sobre desinfección de agua de la AWWA, proporciona una revisión exhaustiva de la teoría y práctica de una tecnología que ofrece claras ventajas pero también genera preocupación. El autor es un experto en el tema y presenta buenas ilustraciones.

El segundo libro es de carácter académico y describe la formación y el uso de los compuestos oxiclорados en el tratamiento del agua y otras aplicaciones, como en la industria textil, de harina, de productos alimenticios y la purificación del aire.

El tercer libro describe cinco plantas de tratamiento del agua que tenían dificultades en el cumplimiento de las normas referidas a trihalometanos y que modernizaron sus sistemas de cloración para producir dióxido de cloro.