

## COLORO

**Keith A. Christman**  
Consejo de Química del Cloro  
Arlington, VA, EUA

### RESUMEN

La cloración ha desempeñado una función crítica al proteger los sistemas de abastecimiento de agua potable de las enfermedades infecciosas transmitidas por el agua durante casi un siglo. Se ha reconocido ampliamente a la cloración del agua potable como uno de los avances más significativos en la protección de la salud pública. La filtración y la cloración prácticamente han eliminado las enfermedades transmitidas por el agua (como el cólera, la tifoidea, la disentería y la hepatitis A) en los países desarrollados. En los Estados Unidos, más de 98% de los sistemas de abastecimiento que desinfectan el agua potable usan cloro debido a su potencia germicida, economía y eficiencia. Además, los desinfectantes basados en cloro son los únicos desinfectantes importantes con las propiedades residuales duraderas que previenen un nuevo crecimiento microbiano y proporcionan protección continua durante todo el proceso de distribución de la planta de tratamiento al hogar. Este documento trata las ventajas y desventajas del cloro y actualiza al lector con respecto a los conocimientos actuales sobre los subproductos de la desinfección.

#### 1. Historia

Desde hace 90 años, la cloración desempeña una función trascendental en la protección de los sistemas de abastecimiento de agua potable contra enfermedades infecciosas transmitidas por el agua. La filtración y la desinfección con cloro del agua potable han sido responsables de gran parte del 50% de aumento de la expectativa de vida en los países desarrollados durante el siglo XX. Este hecho motivó a la revista *Life* a citar recientemente a la filtración y la cloración del agua potable como "probablemente el más significativo avance en salud pública del milenio".

En 1846, el doctor Ignaz Semmelweis introdujo uno de los primeros usos del cloro como desinfectante. Mientras trabajaba en un hospital de Viena, determinó que la

fiebre de los niños y otras infecciones eran transmitidas de un paciente a otro por los doctores que no se lavaban las manos después de cada examen. Entonces, instituyó un procedimiento de desinfección que requería que los médicos se lavasen las manos con jabón y agua con cloro. Uno de los primeros usos conocidos del cloro para la desinfección del agua se dio en 1854, cuando el doctor John Snow intentó desinfectar el sistema de abastecimiento bombeado de agua de la calle Broad en Londres después de un brote de cólera. En 1897, después de un brote de tifoidea, Sims Woodhead usó “solución de lejía” como una medida temporal para esterilizar las tuberías de distribución de agua potable en Maidstone, Kent (Inglaterra).

La cloración continua del agua potable empezó en los primeros años de este siglo en Gran Bretaña, donde su aplicación redujo grandemente las muertes por tifoidea. Poco después de este notable éxito, la cloración empezó en los Estados Unidos en la



ciudad de Jersey, Nueva Jersey en 1908. Pronto, la adopción por parte de otras ciudades y pueblos en los Estados Unidos dio lugar a la virtual eliminación de las enfermedades transmitidas por el agua, tales como el cólera, la tifoidea, la disentería y la hepatitis A (White, 1986). Antes de la llegada de la cloración para el tratamiento de agua potable, aproximadamente 25 de cada 100.000 personas morían anualmente en los Estados Unidos a causa de la fiebre tifoidea, una tasa de mortalidad que se aproximaba a la actual tasa asociada con accidentes automovilísticos.

## 2. Cómo mata el cloro a los agentes patógenos

En 1881, el bacteriólogo alemán Robert Koch demostró, bajo condiciones controladas de laboratorio, que el hipoclorito (lejía) podía destruir cultivos puros de bacterias. El grueso de la investigación sobre desinfección con cloro realizada desde los años cuarenta a los setenta, con énfasis en las bacterias, proporcionó observaciones sobre la manera en que el cloro mata a estos microorganismos. Las observaciones que (1) las células bacterianas dosificadas con cloro liberan ácidos

nucleicos, proteínas y potasio y (2) las funciones de la membrana, tales como la respiración y el transporte activo, resultan más afectadas por el cloro que los procesos citoplasmáticos, dirigieron la atención de los investigadores a la superficie de la célula bacteriana. La hipótesis fue que, bajo una presión ambiental, la pared de la célula bacteriana podía interactuar con el cloro. La exposición al cloro parece causar alteraciones físicas, químicas y bioquímicas en la pared de la célula. De esa manera destruye la barrera protectora de la célula, con lo que concluyen las funciones vitales y se produce la muerte del microorganismo. Una posible secuencia de los eventos durante la cloración sería: (1) la eliminación de la barrera suministrada por la pared de la célula mediante reacciones del cloro con determinados sitios en la superficie de la célula, (2) la liberación de elementos constitutivos celulares vitales, (3) la terminación de las funciones asociadas con la membrana y (4) la terminación de las funciones celulares. Durante el transcurso de esta secuencia de eventos, el microorganismo muere, lo que significa que ya no es capaz de crecer ni causar enfermedad alguna. (Pregunte a los Expertos, sitio Web *Scientific American*, 1998)

## 2.1 Valores CT

Para el tratamiento eficaz del agua, la industria del abastecimiento de agua ha reconocido la necesidad de una exposición adecuada al desinfectante y una dosis suficiente de desinfectante por un determinado período. En los años ochenta ambas funciones se combinaron, a través del desarrollo de los valores CT para diversos desinfectantes.

El valor CT representa la combinación de la dosis de desinfectante y el tiempo que el agua ha estado expuesta a una mínima cantidad de desinfectante residual. Matemáticamente, esto se representa como:

$$\begin{aligned} \text{CT} &= \text{concentración} \times \text{tiempo} \\ \text{concentración} &= \text{concentración final de desinfectante en mg/l} \\ \text{tiempo} &= \text{tiempo mínimo de exposición en minutos} \end{aligned}$$

En una evaluación de la eficacia de la desinfección, se eligieron dos tipos de organismos como substitutos de desinfección – el protozooario *Giardia* y los virus. Los valores CT establecidos para la desinfección de las aguas superficiales requieren plantas de tratamiento que obtengan una reducción de tres logaritmos o 99,9% en el caso de la *Giardia* y una reducción de cuatro logaritmos o 99,99% en el caso de los virus. Los cuadros 1 y 2 proporcionan datos de valores CT para los diversos desinfectantes.

Es importante reconocer que el uso de cloro como desinfectante es sólo una parte del proceso de tratamiento. Igualmente importante es la necesidad de una mejor filtración para extraer los organismos. Una combinación de desinfección y filtración adecuadas es muy eficaz para proporcionar agua potable segura. Los

experimentos recientes para controlar el *Cryptosporidium* también sugieren la eficacia de la filtración en el proceso de tratamiento del agua.

**Cuadro 1. Valores CT para la reducción de 99,9% de *Giardia lamblia***

Desinfectante	pH	Temperatura °F (°C)					
		33,8 (1)	41 (5)	50 (10)	59 (15)	68 (20)	77 (25)
Cloro libre	6	165	116	87	58	44	29
	7	236	165	124	83	62	41
	8	346	243	182	122	91	61
	9	500	353	265	177	132	88
Ozono	6-9	2,9	1,9	1,4	0,95	0,72	0,48
Dióxido de cloro	6-9	63	26	23	19	15	11
Cloraminas	6-9	3800	2200	1850	1500	1100	750

Fuente: Manual de Orientación de la EPA (1989)

**Cuadro 2. Valores CT para la inactivación de Virus**

Desinfectante	pH (6-9) Inactivación	Temperatura °F (°C)					
		39,9 (0,5)	41 (5)	50 (10)	59 (15)	68 (20)	77 (25)
Cloro libre	2	6	4	3	2	1	1
	3	9	6	4	3	2	1
	4	12	8	6	4	3	2
Ozono	2	0,9	0,6	0,5	0,3	0,25	0,15
	3	1,4	0,9	0,8	0,5	0,4	0,25
	4	1,8	1,2	1	0,6	0,5	0,3
Dióxido de cloro	2	8,4	5,6	4,2	2,8	2,1	-
	3	25,6	17,1	12,8	8,6	6,4	-
	4	50,1	33,4	25,1	16,7	12,5	-
Cloraminas	2	1243	857	643	428	321	214
	3	2063	1423	1067	712	534	356
	4	2883	1988	1491	994	746	497

Fuente: Manual de Orientación de la EPA (1989)

### 3. Cloro: el desinfectante preferido para el agua potable

Los productos químicos basados en cloro han sido los desinfectantes preferidos para tratar el agua potable durante casi un siglo. De hecho, en los Estados Unidos, 98% de todos los sistemas de abastecimiento que tratan el agua emplean desinfectantes basados en cloro. Estas instalaciones usan cloro porque ha resultado sumamente bueno, es seguro de usar cuando se maneja adecuadamente y es muy eficaz en función de costos. Más de 200 millones de estadounidenses y canadienses reciben agua potable desinfectada con cloro cada día.

**Cuadro 3. Prácticas de desinfección en los Estados Unidos**

Desinfectante	Porcentaje *
Gas de cloro	87,0
Sin amoníaco	67,0
Con amoníaco	20,0
Cloro e hipoclorito	4,5
Cloro y dióxido de cloro	3,0
Cloro y dióxido de cloro y nitrógeno amoniacal	1,5
Hipoclorito	1,5
Cloro e hipoclorito y nitrógeno amoniacal	0,75
Cloro y dióxido de cloro e hipoclorito	0,37
[Subtotal: 98,6% usan los desinfectantes basados en cloro]	
Ozono	0,37
Otro	0,75

\* porcentaje de instalaciones que desinfectan

Fuente: 1989-1990 Encuesta del Comité de Desinfección de la AWWA sobre las Prácticas de Desinfección

Si bien los atributos más importantes del cloro son su potencia germicida de amplio espectro y su persistencia en los sistemas de distribución de agua, también su capacidad para abordar eficaz y económicamente muchas otras preocupaciones relacionadas con el tratamiento del agua ha contribuido a su amplio uso. Los compuestos basados en cloro son los únicos desinfectantes importantes que presentan propiedades residuales duraderas. La protección residual impide un nuevo crecimiento microbiano y previene la contaminación del agua durante su recorrido desde la planta de tratamiento hasta los grifos domésticos.

La popularidad del cloro en la desinfección de agua se basa en muchos factores. Un estudio realizado por J. Carrell Morris, de la Escuela de Medicina de la Universidad de Harvard, identificó muchos de los beneficios del cloro en el tratamiento del agua (Morris, 1985).

- **Germicida potente.** Se ha demostrado que el uso del cloro reduce el nivel de los microorganismos patógenos en el agua potable hasta niveles casi imposibles de medir.
- **Cualidades residuales.** El cloro produce una acción desinfectante residual sostenida que es "única entre los desinfectantes de agua en gran escala disponibles". La superioridad del cloro como desinfectante residual sigue siendo válida hasta hoy. La presencia de un residuo sostenido mantiene la higiene del agua potable final desde la planta de tratamiento hasta el grifo del consumidor.
- **Control del gusto y olores.** La cloración del agua potable reduce los gustos y olores. El cloro oxida muchas sustancias que se presentan naturalmente, tales como las secreciones de algas malolientes y los olores de la vegetación en descomposición, lo que da como resultado agua potable inodora y con mejor sabor.
- **Control del crecimiento biológico.** La potente acción germicida del cloro elimina las bacterias, mohos y algas. El cloro controla estos organismos molestos que por lo general crecen en los reservorios, en las paredes de las troncales de transmisión de agua y en los tanques de almacenamiento.
- **Control químico.** El cloro en el tratamiento del agua destruye el sulfuro de hidrógeno y elimina el amoníaco y otros compuestos nitrogenados que tienen sabores desagradables y obstaculizan la desinfección.

### **3.1 Costos de equipo**

Los costos de los equipos varían según la cantidad y tipo de producto químico que se va a usar, el tipo de control requerido (de requerirse alguno) y las necesidades de instalación. En el cuadro 4 se enumeran los costos estimados de los equipos.

#### Cuadro 4. Costos de los equipos

Descripción	Costos
Dosificador manual de gas, instalado en recipiente	\$2.000
Dosificador automático de gas, instalado en la pared	\$4.000
Dosificador automático de gas, instalado en gabinete	\$6.000
Bomba de mano para alimentación de compuestos químicos	\$1.000
Bomba automática para alimentación de compuestos químicos	\$3.000
Detector de gas, instalado en la pared	\$2.000
Estuche de emergencia, Tipo A	\$1.500
Estuche de emergencia, Tipo B	\$2.500

### 3.2 Costos de operación y mantenimiento

Los costos de operación y mantenimiento asociados con la alimentación de cloro y gases de amoníaco, así como soluciones de hipoclorito y sales de amoníaco, varían según el tipo de producto químico y según el tamaño y la complejidad del equipo. El presupuesto para los costos anuales de operación y mantenimiento varía de 10 a 20 por ciento de los costos del equipo. Los fabricantes de equipos proporcionan una lista de los repuestos recomendados que como mínimo deben estar disponibles. La mayoría de los fabricantes capacitan al personal de la planta de tratamiento en el mantenimiento y servicio de su equipo. Además, algunos fabricantes proporcionan un programa de intercambio para posibilitar que sus equipos reciban mantenimiento en sus instalaciones. Esto permite al personal de operaciones enviar el equipo a reparación mientras se instala una unidad de repuesto o intercambio para que opere durante el período de reparación.

## 4. Protección de la salud pública — un trabajo incompleto

El beneficio principal del agua potable clorada es la protección de la salud pública a través del control de las enfermedades transmitidas por el agua. La cloración desempeña una función primordial en el control de los agentes patógenos presentes en el agua, tal como lo demuestra la virtual ausencia de enfermedades transmitidas por el agua, como la tifoidea y el cólera, en los países desarrollados.

Los sistemas de abastecimiento de agua potable sin tratar, o con un tratamiento inadecuado, siguen siendo la mayor amenaza para la salud pública, especialmente en los países en desarrollo, donde casi la mitad de la población consume agua contaminada. En estos países, enfermedades como el cólera, la tifoidea y la disentería crónica son endémicas y matan a niños y a adultos. En 1990, más de tres millones de niños menores de cinco años murieron por enfermedades diarreicas.

Lamentablemente, en muchas áreas prácticamente no existen sistemas de abastecimiento de agua potable debido a la pobreza, la poca comprensión de los peligros de la contaminación de agua y la falta de infraestructura para el tratamiento y la distribución del agua. Los organismos de cooperación internacional, incluida la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), llevan a cabo desde hace mucho tiempo programas de asistencia técnica y educación destinados a mejorar las prácticas de abastecimiento de agua y saneamiento. Se estima que tales mejoras (incluida la desinfección con cloro) pueden prevenir 25% de los brotes diarreicos y reducir la mortalidad infantil en niveles similares (Craun, 1996).

Un ejemplo reciente de la continua amenaza a la salud pública planteada por los brotes de enfermedades transmitidas por el agua se dio en el Perú en 1991, donde un factor principal fue la ausencia o insuficiencia de desinfección del agua potable. Supuestamente, esta falta de desinfección se basó en parte en la inquietud suscitada a raíz de informes publicados en los Estados Unidos respecto a la presencia y riesgos potenciales de los subproductos de la cloración. El resultado ha sido una epidemia persistente del cólera, la primera en aparecer en este siglo en las Américas. La epidemia se propagó a 19 países latinoamericanos y sólo se redujo parcialmente a través de las intervenciones de salud pública realizadas con el asesoramiento y la asistencia técnica de la OPS. Se reportaron aproximadamente un millón de casos y 10.000 muertes (Craun, 1996).

Estas estadísticas refuerzan firmemente el concepto de que la desinfección del agua debe ser una herramienta esencial para la protección de la salud pública en todo el mundo. Según destaca la Academia de Microbiología de los Estados Unidos: "El requisito más importante que se debe recalcar es que no se debe mediatizar la desinfección de un abastecimiento público de agua" (Ford y Colwell, 1996).

En la Primera Conferencia Internacional sobre Seguridad de la Desinfección del Agua realizada en 1992, una ponencia presentada por Gunther F. Craun y otros colegas trató sobre la relación costo/efectividad del tratamiento de aguas para la remoción de agentes patógenos (Craun, 1994a). Una evaluación de cinco agentes patógenos y los costos de tratamiento muestran los beneficios económicos favorables de prevenir las enfermedades infecciosas transmitidas por el agua. Estos beneficios se determinaron sobre la base de una probabilidad anual de enfermedad y muerte en el supuesto de que no exista tratamiento de agua y un costo de \$3.000 por enfermedad y \$500.000 por muerte. La eficacia del tratamiento del agua en la reducción de las enfermedades transmitidas por ésta depende de la calidad del agua de la fuente, y de cómo se opera y mantiene el sistema de tratamiento.

El siguiente cuadro muestra razones positivas de costo-beneficio asociados con la instalación de sistemas cloración y tratamiento convencional para remover y

controlar los agentes patógenos del agua potable. Estas razones se calcularon mediante la comparación de la probabilidad de enfermedades inevitables, para lo cual se usó la diferencia entre las probabilidades de enfermedades sin tratamiento del agua y las probabilidades con diversos niveles del tratamiento del agua en comunidades con poblaciones de 10.000, 100.000 y 500.000 habitantes.

**Cuadro 5. Razones positivas de costo-beneficio -- tratamiento de agua y remoción de agentes patógenos**

POBLACIÓN	10.000	100.000	500.000
<b>(a) Sólo costos de tratamiento</b>			
Fuente de agua adecuada			
sólo cloración	50,2	86,2	98,6
tratamiento convencional más cloración	18,4	39,5	53,1
Fuente de agua deficiente			
sólo cloración	37,6	64,6	73,9
tratamiento convencional más cloración	17,5	37,5	53,1
<b>(b) Sistemas completos de agua</b>			
Fuente de agua adecuada			
sólo cloración	5,0	8,6	9,9
tratamiento convencional más cloración	1,8	4,0	5,3
Fuente de agua deficiente			
sólo cloración	3,8	6,5	7,4
tratamiento convencional más cloración	1,8	3,8	5,3
<b>(c) Supuestos para los peores casos</b>			
Fuente de agua adecuada			
sólo cloración	8,0	13,8	15,8
tratamiento convencional más cloración	2,9	6,3	8,5
Fuente de agua deficiente			
sólo cloración	6,0	10,4	11,8
tratamiento convencional más cloración	2,8	6,0	8,1

Razón entre el beneficio monetario de evitar la enfermedad y el costo del tratamiento del agua potable.

El informe concluyó que "los sistemas municipales de agua diseñados para prevenir las enfermedades infecciosas transmitidas por el agua son una de las inversiones más eficaces de los fondos públicos que puede realizar la sociedad. Incluso los cálculos conservadores en las peores condiciones muestran razones de costo-beneficio de 3:1 para sistemas pequeños y de 8:1 para sistemas grandes. El agua potable sin agentes patógenos es una ganga".

En lo que concierne a la comparación de estos beneficios con los riesgos potenciales de cáncer asociados con la desinfección del agua potable, el grupo observó que los costos para prevenir los riesgos cancerígenos relativamente pequeños pueden no justificarse, tomando en cuenta que existen muchos otros riesgos de salud pública que deben reducirse.

#### **4.1 Riesgos de enfermedades transmitidas por el agua: lo antiguo y lo nuevo**

Las enfermedades transmitidas por el agua siguen presentando retos para las autoridades de salud pública y para las empresas de abastecimiento de agua. La presencia de microorganismos patógenos en el agua que sale del grifo se debe generalmente a la deficiente calidad del agua de la fuente, así como a deficiencias en los procesos de tratamiento de desinfección y filtración o a problemas en los sistemas de distribución.

En la mayoría de casos, los brotes de enfermedades transmitidas por el agua se producen en sistemas de abastecimiento con inadecuada desinfección o sin ella. Sin embargo, existen nuevas inquietudes sobre agentes patógenos emergentes como el *Cryptosporidium*, que incluso aparecen en sistemas de abastecimiento de agua de alta calidad (Craun et al, 1994b).

Los agentes patógenos transmitidos por el agua se agrupan en tres clases generales: bacterias, virus y protozoarios parasitarios, cada una con diversas especies identificadas. Las bacterias y virus contaminan tanto las aguas superficiales como las subterráneas, mientras que los protozoarios parasitarios aparecen predominantemente en el agua superficial (Tardiff, 1993).

**Cuadro 6. Agentes patógenos transmitidos por el agua**

<b>Bacterias</b>	<b>Virus</b>	<b>Protozoarios</b>
<i>Campylobacter</i>	Tipo Norwalk	<i>Cryptosporidium parvum</i>
<i>Escherichia coli</i>	Enteró (poliomielitis, coxsackie, echovirus, rotavirus)	<i>Giardia lamblia</i>
<i>Salmonella</i> (no tifoidea)	Hepatitis A	<i>Entamoeba histolytica</i>
<i>Shigella</i>	Rotavirus	
<i>Yersinia</i>		
<i>Vibrio</i> (no cólera)		
<i>Salmonella</i> (tifoidea)		
<i>Vibrio</i> (cólera)		
<i>Legionella</i>		

#### 4.2 *Enfermedades asociadas con agentes patógenos transmitidos por el agua*

Las bacterias y protozoarios generalmente producen trastornos gastrointestinales con una intensidad muy variable. Las bacterias también causan enfermedades que pueden ser mortales como la tifoidea y el cólera. Los virus causan enfermedades graves como la meningitis aséptica, la encefalitis, la poliomielitis, la hepatitis, la miocarditis y la diabetes (Payment, 1993). Además, los trastornos gastrointestinales pueden atribuirse a microorganismos no identificados o no especificados. En términos de ocurrencias en los Estados Unidos, las infecciones por protozoarios son las más comunes, seguidas de las bacterianas y las virales (Craun, 1996b).

**Cuadro 7. Causas de brotes transmitidos por agua en EUA, 1971-92**

Causa del brote	Porcentaje de brotes	
	Sistemas comunitarios de abastecimiento de agua	Sistemas no comunitarios de abastecimiento de agua
Contaminación del sistema de distribución	29%	7%
Desinfección inadecuada del agua superficial no filtrada	24%	8%
Desinfección inadecuada de aguas subterráneas	14%	30%
Aguas subterráneas sin tratar	11%	42%
Filtración inadecuada del agua superficial	11%	1%
Causas varias; causas desconocidas	5%	6%
Uso inadecuado de productos químicos	3%	1%
Agua superficial sin tratar	2%	5%
Filtración inadecuada de aguas subterráneas	1%	0
TOTAL	100%	100%

Craun también relacionó los brotes con las fuentes de agua y las técnicas de tratamiento en los sistemas comunitarios de abastecimiento de agua. En el caso de sistemas en los que se empleaba agua superficial, se identificó a la contaminación de la fuente y las deficiencias en el tratamiento como los principales factores causantes de los brotes. Las aguas subterráneas sin tratar o inadecuadamente tratadas fueron responsables de 10 a 14 por ciento de todos los brotes entre 1971 y 1992. Durante todo el período, las aguas subterráneas contaminadas, sin tratar o

inadecuadamente tratadas, fueron responsables de más brotes que las aguas superficiales contaminadas.

## **5. El debate sobre los subproductos de la desinfección**

Durante casi 25 años, la política de reglamentación del agua potable en los Estados Unidos se ha centrado principalmente en mitigar los riesgos potenciales para la salud asociados con contaminantes químicos en los sistemas de abastecimiento de agua potable. Este énfasis en los contaminantes químicos lo causó la falsa creencia de que las amenazas microbiológicas se encontraban en gran parte bajo control y, en cierta medida, la existencia de una “fobia química”.

En 1974, los científicos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) determinaron que el cloro reacciona con ciertos materiales orgánicos durante la desinfección de agua para crear trihalometanos (THM), en particular el cloroformo y otros THM en cantidades menores. Los estudios toxicológicos emprendidos realizados sobre el cloroformo sugirieron que era cancerígeno para animales de laboratorio, aunque en niveles mucho mayores que los encontrados en el agua potable. Los temores de que los THM pudieran ser potencialmente cancerígenos para los humanos, llevaron a la EPA a fijar límites reglamentarios para estos subproductos de la desinfección (SPD); este límite es de 100 partes por mil millones (ppmm) en el caso de sistemas que atienden a más de 10.000 personas. Sin embargo, en Estados Unidos todavía no hay límites reglamentarios para los subproductos de desinfección en sistemas pequeños.

En 1994, la EPA propuso la etapa I de una regla para subproductos de desinfectantes/desinfección. Esta regla reduciría el nivel máximo de contaminantes (NMC) para los subproductos de desinfección y ampliaría la cobertura para incluir a los sistemas pequeños. En noviembre de 1997, la EPA recomendó revisiones para esta regla propuesta. Estas revisiones se basaron en un convenio entre los miembros de un Comité Federal Asesor que incluía a representantes de empresas de abastecimiento de agua, el Consejo de Química de Cloro, funcionarios de salud pública, defensores del medio ambiente y otros grupos involucrados. La meta de la nueva etapa I de la regla sobre subproductos de desinfección es reducir los niveles de SPD en el agua potable sin comprometer la protección microbiana. La regla ordena un proceso llamado coagulación mejorada para eliminar los precursores de SPD. La propuesta también fija los nuevos NMC para THM totales en 80 ppmm, para ácidos haloacéticos en 60 ppmm y para bromato en 10 ppmm. El Comité Federal Asesor fue cauteloso respecto a promover el uso de otros desinfectantes que producirían otros subproductos desconocidos. El Comité también fue muy cuidadoso en cuanto a cualquier cambio que pudiese alentar a las empresas de abastecimiento de agua a reducir el nivel de desinfección actualmente practicada. Existió un acuerdo generalizado entre los miembros del grupo en cuanto a que no

se debía permitir un incremento en el riesgo de presencia de microorganismos patógenos en el agua potable. La propuesta final estará lista en noviembre de 1998.

### **5.1 El riesgo del cloroformo es menor de lo que se creía**

Al finalizar la Etapa I de la regla sobre SPD, la EPA ha examinado la base científica para la misma. El 31 de marzo de 1998, la EPA publicó una Nota sobre la Disponibilidad de Datos de Subproductos de Desinfectantes y Desinfección. Esta nota proponía cambios en las metas de niveles máximos de contaminantes (MNNC) para SPD sobre la base de las nuevas investigaciones recientemente disponibles. La EPA fija la MNNC en un nivel en el que no se esperan efectos adversos conocidos o previstos sobre la salud, y que permite un margen de seguridad adecuado. El aumento de la MNNC para el cloroformo de 0 a 300 ppm fue el cambio más importante de esta nota en relación con el cloro. Al proponer este cambio, la EPA siguió las recomendaciones de un panel de expertos convocado por el Instituto Internacional de Ciencias de la Vida. El panel de expertos concluyó que el cloroformo tenía “probabilidad de ser cancerígeno por encima de una dosis determinada, pero poca probabilidad de ser cancerígeno por debajo de cierta dosis” (ILSI, 1997).

Otros grupos también han examinado los datos sobre SPD y cáncer. En 1990, la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (AIIC) convocó un taller de expertos para evaluar la posible naturaleza cancerígena del agua potable clorada. La AIIC es una división de investigación de la Organización Mundial de la Salud que evalúa regularmente la posibilidad de diferentes materiales como causa de cáncer en los humanos. El grupo de trabajo de la AIIC evaluó los principales análisis científicos disponibles sobre los potenciales efectos del agua potable clorada en la salud. Su conclusión fue que el agua potable clorada **no es clasificable como cancerígena para los humanos** (AIIC, 1991).

El Programa Nacional de Toxicología (PNT) del Departamento de Salud y Servicios Sociales de los Estados Unidos llegó a una conclusión similar en 1990. El estudio del PNT examinó la naturaleza cancerígena del agua clorada en ratas y ratones de laboratorio. Es importante señalar que el agua empleada en este estudio fue clorada muy por encima de los niveles de cloración encontrados en sistemas públicos de abastecimiento de agua. El estudio del PNT llegó a la conclusión de que no existían evidencias de actividad cancerígena causada por el consumo de agua clorada en ratones machos y hembras o ratas machos. En las ratas hembras se observaron evidencias ambiguas de actividad cancerígena (PNT, 1990).

Actualmente, no son concluyentes los estudios sobre si los subproductos de la desinfección con cloro causan cáncer. Además de las inquietudes respecto al cáncer, los nuevos estudios se han centrado en los abortos espontáneos y en los efectos que pueden tener los SPD en el desarrollo. Un estudio reciente del Departamento de Servicios de Salud de California reportó un alto riesgo de aborto

espontáneo en mujeres que bebían agua del grifo con altos niveles de SPD. Sin embargo, cuando las tres comunidades estudiadas se analizaron por separado, este resultado fue estadísticamente significativo en sólo una de las tres comunidades. No es claro que los abortos estuvieran relacionados de alguna manera con la cloración. Se requiere profundizar la investigación.

## **5.2 Riesgos comparativos: contaminantes microbianos vs. contaminantes químicos**

La tarea de las entidades reguladoras es maximizar la protección de la salud pública mediante la administración de los riesgos relativos para la salud humana de los contaminantes microbiológicos y químicos en el agua potable. La continua evidencia de aparición de enfermedades transmitidas por el agua indica que los riesgos microbianos deben recibir mucha mayor atención que los SPD. Por este motivo, la Academia de Microbiología de los Estados Unidos ha recomendado que “los riesgos para la salud suscitados por los agentes patógenos microbianos deben recibir la más alta prioridad en el tratamiento de agua para proteger la salud pública” (Ford y Colwell, 1996). Además, personal de la EPA ha observado que los riesgos de enfermedades microbianas transmitidas por agua potable no desinfectada son 100 a 1.000 veces mayores que los riesgos planteados por los SPD (Regli, 1993).

En 1993, en un estudio presentado a la EPA por el Instituto de Cloro durante el curso de las primeras negociaciones sobre la regla respecto a los SPD, el Dr. Robert Tardiff presentó los resultados de la aplicación de cinco criterios esenciales para determinar los riesgos comparativos para la salud de la contaminación microbiana y de la contaminación química. Los cinco criterios para evaluar las enfermedades relacionadas con el agua son: 1) tipos, 2) incidencia, 3) intensidad, 4) latencia y 5) certidumbre de la ocurrencia (Tardiff, 1993).

El informe del Dr. Tardiff concluyó que el riesgo de las enfermedades microbianas es mucho mayor que el presentado por productos químicos potencialmente cancerígenos en los seres humanos. Es importante señalar que existen diferencias significativas en cuanto a la incidencia de las enfermedades, el tiempo (latencia) entre la exposición y la enfermedad clínica y la certeza de que muchas personas se enfermarán. Si se les compara con los riesgos químicos, los riesgos microbianos son mucho mayores (1.000 a 100.000 veces mayores), su latencia es mucho menor (días contra decenios) y es casi un hecho que causarán enfermedades en los seres humanos.

Un informe publicado en 1994 por la Sociedad Internacional de Legislación de Toxicología y Farmacología estipulaba que “la reducción de la mortalidad debido a enfermedades infecciosas transmitidas por el agua, atribuida en gran parte a la cloración de los sistemas de abastecimiento de agua potable, parece exceder cualquier riesgo teórico de cáncer (que podría ser tan bajo como 0) presentado por

las diminutas cantidades de productos orgánicos clorados encontradas en el agua potable desinfectada con cloro” (Coulston y Kolbye, 1994).

Este punto de vista es apoyado por la Academia de Microbiología de los Estados Unidos: “Es importante indicar que no existen pruebas directas ni definitivas de que los subproductos de la desinfección afecten la salud de los seres humanos en las concentraciones encontradas en el agua potable ... No se debe permitir que las preocupaciones sobre la toxicología de estos subproductos comprometan la exitosa desinfección del agua potable, al menos mientras no existan datos que apoyen dichas decisiones”. (Ford y Colwell, 1996)

Aunque gran parte de la investigación se ha centrado en los subproductos del cloro, también otros desinfectantes químicos generan subproductos cuando reaccionan con materia orgánica y otros precursores en el agua sin tratar. El bromato, por ejemplo, es principalmente un subproducto de la ozonización de aguas con alto contenido de bromuro. La EPA está reglamentando el bromato en la etapa I de la regla.

### **5.3 Control de los subproductos de la desinfección**

Si bien el mantener una desinfección adecuada es una necesidad absoluta, también se pueden realizar algunas acciones para reducir los niveles de SPD sin comprometer la protección microbiana. La capacidad de las plantas de tratamiento para reducir los SPD depende de algún modo de la economía. Si no existen recursos disponibles para reducir los SPD, la planta de tratamiento deberá continuar desinfectando adecuadamente el agua.

Las empresas de abastecimiento de agua pueden emplear técnicas de tratamiento que maximicen la seguridad y la calidad del agua potable al mismo tiempo que minimizan el riesgo de formación de subproductos. Uno de los mejores métodos para controlar los SPD de cualquier proceso de desinfección es eliminar los precursores orgánicos antes de la desinfección. Otros métodos convencionales incluyen el cambio del punto de cloración mediante el uso de cloramina en el sistema de distribución y la reducción de la tasa de alimentación de cloro, aunque esto puede conducir a aumentos inadmisibles del riesgo microbiano. Un informe del Comité de Calidad del Agua de la *American Water Works Association* (AWWA) identificó procedimientos eficaces para reducir la formación de trihalometanos (THM) de la siguiente manera (AWWA, 1991):

### 5.3.1 *Remoción de precursores orgánicos*

Existen tres maneras de remover eficazmente los precursores orgánicos:

#### Coagulación y clarificación

La mayoría de las plantas de tratamiento optimizan su proceso de coagulación para remover la turbiedad (partículas). Sin embargo, es posible optimizar los procesos de coagulación para remover la materia orgánica natural. Los precursores se eliminan cuando se usa alumbre o sales de hierro como coagulantes para el control de la turbiedad. Generalmente se logra una mayor remoción de los precursores si se disminuye el pH antes de agregar estos coagulantes o al momento de agregarlos.

#### Adsorción

Los procesos de adsorción se han usado con éxito en algunas aplicaciones para remover precursores de los subproductos de la desinfección. El carbón activo puede proporcionar adsorción. Se ha realizado una significativa investigación para determinar la capacidad del carbón activo para remover sustancias orgánicas disueltas y microcontaminantes específicos. El carbón activo cumple esta función tanto en presentación granular como en polvo.

#### Tecnología de membranas

Las membranas se han usado desde hace mucho para la desalinización de las aguas salobres. El proceso usa la presión hidráulica para forzar al líquido que pase a través de una membrana semipermeable. Con la aplicación de esta tecnología se logra una excelente remoción de los precursores de los trihalometanos. En el informe de la AWWA se señala que los procedimientos con membranas “remueven efectivamente los precursores del producto final (agua potable), lo que las convierte en una opción prometedora para el control futuro de los THM y otros subproductos de la desinfección”.

Muchas de estas tecnologías pueden tener un costo prohibitivo en los países en desarrollo. De ser éste el caso, es imperativo recalcar la importancia de mantener una desinfección adecuada.

### **5.4 *Procesos de tratamientos alternativos***

A lo largo de toda la historia del tratamiento del agua se han estudiado alternativas a la cloración y se han propuesto diversos métodos de desinfección. Algunas técnicas de tratamiento tienen un valor cuestionable para el tratamiento del agua potable. Los estudios realizados por Richard J. Bull, W.P. Heffernan y otros indicaron que los desinfectantes alternativos también producen una serie de

subproductos. Estos resultados demostraron que todos los métodos conocidos para la desinfección del agua potable (con la posible excepción de la radiación ultravioleta) involucran el uso de productos químicos reactivos y, como tal, dan lugar a la formación de subproductos (Bull y Kopfler, 1991).

La industria del agua ha venido evaluando diversas alternativas a los desinfectantes con contenido de cloro. Cada opción tiene sus ventajas, y desventajas, las cuales se deben evaluar sobre la base de riesgos, incertidumbres y beneficios. Esto es especialmente importante si se considera la limitada experiencia y el reducido conocimiento respecto a estos procesos. En comparación con la cloración, se conoce relativamente poco de los subproductos potenciales de estos desinfectantes alternativos.

A continuación se describen las ventajas y desventajas conocidas de los procedimientos basados en el cloro y los procedimientos de desinfección alternativos (White, 1986):

#### *5.4.1 Desinfectantes con contenido de cloro*

##### Cloraminas

En este proceso se agrega amoníaco y compuestos de cloro a una planta de filtración de agua. Cuando se le controla adecuadamente, la mezcla forma cloraminas. Éstas se usan comúnmente para mantener un residuo en el sistema de distribución, luego de lo cual se realiza el tratamiento con un desinfectante más potente, como el cloro libre.

##### Ventajas de la cloramina

- Residuo persistente
- Minimización de sabores y olores
- Menores niveles de formación de THM y ácido haloacético (AHA)
- Desinfección eficaz de películas biológicas en el sistema de distribución

##### Desventajas de la cloramina

- Produce subproductos de desinfección, incluidos compuestos basados en nitrógeno, así como el hidrato de cloral que se puede reglamentar como un SPD en el futuro. Existe escasa información sobre la toxicidad de los subproductos de desinfección con cloramina. En un análisis de los efectos de métodos alternativos sobre la salud, Bull sostiene que “existe poca información sobre la cual basar un estimado del riesgo para la salud que plantea la cloramina” (Bull y Kopfler, 1991).
- Presenta problemas para las personas en las máquinas de diálisis. Los residuos de cloramina en el agua del grifo pueden pasar a través de las

membranas en las máquinas de diálisis e inducir directamente daño por oxidación en los glóbulos rojos.

- Causa irritación en los ojos. La exposición a altos niveles de cloramina puede irritar los ojos.
- Requiere mayor dosificación y tiempo de contacto (mayores valores CT, concentración x tiempo).
- Es cuestionable como germicida viral y parasitario.
- Puede promover el crecimiento de algas en los reservorios y el aumento de bacterias en el sistema de distribución debido al amoníaco residual.
- Puede producir altos niveles de AHA.
- Tiene propiedades de oxidación y desinfección más débiles que el cloro libre.

### Dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>)

El dióxido de cloro se genera en las instalaciones de tratamiento de agua. La popularidad del dióxido de cloro como un desinfectante del agua aumentó en los años setenta cuando se descubrió que no promovía la formación de THM.

#### Ventajas del dióxido de cloro

- Tiene una excelente acción germicida contra los virus.
- No reacciona con el nitrógeno amoniacal para formar aminas cloradas.
- No reacciona con material oxidable para formar THM; destruye hasta 30% de los precursores de THM.
- Destruye los fenoles que causan problemas de gusto y olor en los sistemas de abastecimiento de agua potable.
- Forma pocos SPD clorados, como THM o AHA.
- Desinfecta y oxida eficazmente, incluyendo una buena desinfección tanto de *Giardia* como *Cryptosporidium*.
- Funciona con dosis bajas en la etapa posterior a la desinfección sin necesidad de estaciones reforzadoras.
- Mejora la remoción del hierro y manganeso mediante la oxidación y sedimentación rápida de compuestos oxidados.
- No reacciona con el bromuro para formar bromato o subproductos del bromo.

#### Desventajas del dióxido de cloro

- Se descompone en subproductos inorgánicos. El dióxido de cloro se descompone en clorito y en menor grado en ion de clorato.
- Requiere equipo de generación y manejo de productos químicos en el lugar.
- Ocasionalmente plantea problemas de olor y sabor.

## 5.4.2 Desinfectantes alternativos

### Ozono

Durante varias décadas, se ha usado el ozono en Europa para controlar el sabor y el olor, así como para la remoción de colores y la desinfección.

#### Ventajas del ozono

- Actúa como un excelente virucida.
- Desinfecta y oxida muy eficazmente.
- No produce ningún THM, AHA ni otros subproductos clorados.
- Mejora la remoción de turbiedad bajo ciertas condiciones.
- Desactiva tanto al *Cryptosporidium* como a la *Giardia* y otros agentes patógenos conocidos.
- Controla el sabor y olor.

#### Desventajas del ozono

- Produce subproductos de desinfección que incluyen:
  - Aldehídos
  - Cetonas
  - Ácidos carboxílicos
  - THM de bromo incluido el bromoformo
  - Ácidos Acéticos de bromo
  - Bromato
  - Quinonas
  - Peróxidos
- Fomenta la formación de THM cuando algunos subproductos de la ozonización se combinan con procesos secundarios de desinfección. Se necesitará probablemente un filtro biológicamente activado para eliminar estos precursores recién formados.
- No proporciona un residuo persistente.
- Plantea inquietudes reglamentarias. En los reglamentos futuros sobre subproductos de desinfección, se puede contemplar la necesidad de instalar costosos sistemas de remoción de precursores (como sistemas de filtración con carbón activo granular) en las plantas que usan ozono.
- Requiere inversión de capital. El ozono se debe producir en el lugar por medio de una tecnología costosa que requiere un alto nivel de mantenimiento y una capacitación substancial de los operadores.
- Promueve el crecimiento microbiano. El ozono reacciona fácilmente con materia orgánica más compleja y puede descomponerla en compuestos más pequeños que sirven para aumentar los nutrientes en los sistemas de abastecimiento de agua; por lo tanto fomenta un nuevo crecimiento microbiano en los sistemas de distribución de agua.

## Radiación ultravioleta (UV)

Este proceso incluye la exposición del agua a la radiación UV que inactiva diversos microorganismos. Esta técnica se viene aplicando cada vez más para el tratamiento de aguas residuales, pero su aplicación ha sido muy limitada en el tratamiento de agua potable.

### Ventajas de la radiación ultravioleta

- No requiere almacenamiento químico ni equipo para su manipulación o alimentación.
- No tiene subproductos de desinfección identificados.

### Desventajas de la radiación ultravioleta

- No tiene acción residual
- Requisitos de mantenimiento altos
- Elevados costos de capital inicial
- Elevados costos operativos (energía)
- La acción de desinfección puede verse comprometida por variables tales como la claridad del agua, la dureza (incrustaciones en los tubos UV), la longitud de las ondas de radiación UV o los cortes de energía.

**Cuadro 8. Una mirada a los desinfectantes del agua potable**

<b>Desinfectantes</b>	<b>Eficacia de desinfección</b>	<b>Mantenimiento de un valor residual</b>	<b>Estado de información sobre la química de subproductos</b>	<b>Remoción de colores</b>	<b>Remoción de olores comunes</b>
Cloro	Bueno	Bueno	Adecuado	Bueno	Bueno
Cloraminas	Pobre	Bueno	Limitado	Inaceptable	Pobre
Dióxido de cloro	Bueno	Inaceptable	Adecuado	Bueno	Bueno
Ozono	Excelente	Inaceptable	Limitado	Excelente	Excelente
Radiación Ultravioleta	Regular	Inaceptable	Nulo	N/A	N/A

Fuente: Trussell, R. Rhodes, *Control Strategy 1: Alternative Oxidants and Disinfectants*. 1991.

### 5.4.3 Factores desconocidos asociados con los métodos alternativos

Es limitada la investigación científica del riesgo asociado con los desinfectantes alternativos y sus subproductos de desinfección. La decisión por parte de las empresas de abastecimiento de agua de cambiar la cloración por un método alternativo podría ser peligrosa porque los científicos saben muy poco acerca de los subproductos de desinfección de procesos diferentes a la cloración.

El doctor Richard Bull observó en su análisis sobre los efectos de los desinfectantes y los subproductos de desinfección en la salud que “el acto más irresponsable sería saltar a métodos alternativos no probados debido a riesgos percibidos con las actuales tecnologías que apenas se están empezando a entender” (Bull y Kopfler, 1991).

La EPA reconoció durante el desarrollo de reglamentos sobre subproductos de desinfectantes y de la desinfección que “nosotros [la EPA] actualmente no tenemos un adecuado entendimiento sobre los subproductos formados por los desinfectantes alternativos ni sobre algunos de sus riesgos para la salud” (US EPA, 1991).

La determinación de los riesgos para la salud asociados con desinfectantes y subproductos de desinfección requiere una investigación adicional, especialmente centrada en las principales alternativas de desinfección. Según William H. Glaze et al. (incluido el doctor Bull), se necesita investigaciones orientadas a: (1) evaluar los riesgos toxicológicos relativos de los desinfectantes y sus subproductos y (2) desarrollar modelos con base biológica para las relaciones dosis-respuesta de estos productos químicos (Glaze et al. 1993).

## 6. El futuro de la desinfección con cloro

El debate sobre los subproductos de la desinfección ha llevado a algunas personas a pensar que el uso del cloro en el tratamiento de agua potable va a disminuir. Esto es muy improbable. Los desinfectantes alternativos también crean subproductos. Existen otras maneras más apropiadas de reducir los subproductos de la desinfección, como las tecnologías de remoción de precursores.

Además, el cloro es el desinfectante preferido para el agua potable por una serie de razones. Ningún otro desinfectante puede proporcionar por sí solo la amplia variedad de beneficios del cloro. Los desinfectantes con contenido de cloro proporcionan el efecto residual más eficaz y confiable en los sistemas de distribución. Esta acción residual es una parte importante del enfoque multibarrera para prevenir las enfermedades transmitidas por el agua.

Según la Organización Mundial de la Salud, la **desinfección con cloro es aún la mejor garantía de un agua microbiológicamente segura** (Oficina Regional de la OMS para Europa, *Drinking Water Disinfection*). Es poco probable que esto cambie en un futuro próximo.

## 7. Referencias

American Water Works Association. Water Quality Disinfection Committee. *State of the Art Report*. Denver. 1991.

American Water Works Association. Water Quality Disinfection Committee. Survey of Water Utility Disinfection Practices. *Journal AWWA*. setiembre de 1992: 121-128.

Bull, R.J. y Kopfler, F.C. *Health Effects of Disinfectants and Disinfection By-products*. AWWA Research Foundation. Denver. 1991.

Coulston, F. y Kolbye, A., Eds. *Regulatory Toxicology and Pharmacology.*, 1994, vol 20, (1, parte 2): S424-428.

Craun, G.F. y contribuyentes múltiples. En: *Water Quality in Latin America: Balancing the Microbial and Chemical Risks in Drinking Water Disinfection*. Regional Symposium on Water Quality, Argentina, 1994. Washington, D.C.: International Life Sciences Institute; 1996.

Craun, G.F. Waterborne Disease in the United States. *Water Quality in Latin America*. Pan American Health Organization. Washington, D.C.; 1996: 55-77.

Craun, G.F., Bull, R.J., Clark, R.M., Doull, J., Grabow, W., Marsh, G.M., Okun, D.A., Regli, S., Sobsey, M.D. y Symons, J.M. Balancing Chemical and Microbial Risks of Drinking Water Disinfection, Part I, Benefits and Potencial Risks. *J Water SRT—Agua*, 1994; 43 (4): 192-199.

Craun, G.F., Bull, R.J., Clark, R.M., Doull, J., Grabow, W., Marsh, G.M., Okun, D.A., Regli, S., Sobsey, M.D. y Symons, J.M. Balancing Chemical and Microbial Risks of Drinking Water Disinfection, Part II, Managing the Risks. *J Water SRT—Agua*, 1994; 43 (5): 207-218.

Ford, T.E. y Colwell, R.R. *A Global Decline in Microbiological Safety of Water: A Call for Action*. American Academy of Microbiology. Washington. 1996.

Glaze, W.H., Andelman, J.B., Bull, R.J., Conolly, R.B., Hertz, C.D., Hood, R.D. and Pegram, R.A. Determining Health Risks Associated with Disinfectants and Disinfection By-products: Research Needs. *Management and Operations, Journal AWWA*, 1993.

International Agency for Research on Cancer (World Health Organization). Chlorinated Drinking Water; Chlorination By-products; Some Other Halogenated Compounds; Cobalt and Cobalt Compounds. *IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. 1991.

International Life Sciences Institute. An Evaluation of EPA's Proposed Guidelines for Carcinogen Risk Assessment Using Chloroform and Dichloroacetate as Case Studies. *Report of an Expert Panel*. Nov., 1997.

Morris, J.C. Aqueous Chlorine in the Treatment of Water Supplies. Cambridge: Harvard University, 1985.

National Toxicology Program, U.S. Department of Health & Human Services. Technical Report on the Toxicology and Carcinogenesis of Chlorinated and Chloraminated Water in F344/N Rats and B6C3F1 Mice. 1990.

No. 46, 1829-Water Purification. Edición *Life Millenium*, Oct., 1997.

Payment, P. Viruses: Prevalence of Disease, Levels, and Sources. In: *Safety of Water Disinfection: Balancing Chemical & Microbial Risks*, First International Conference on the Safety of Water Disinfection, Washington, DC, 1992. Washington: International Life Sciences Institute; 1993: 99-113.

Regli, S., Berger, P., Macler, B. y Haas, C. Proposed Decision Tree for Management of Risks in Drinking Water: Consideration for Health and Socioeconomic Factors. En: *Safety of Water Disinfection: Balancing Chemical & Microbial Risks*, First International Conference on the Safety of Water Disinfection, Washington, DC, 1992. Washington: International Life Sciences Institute; 1993: 39-80.

Tardiff, R.G. *Balancing Risks from Chemical Carcinogens & Waterborne Infectious Microbes: A Conceptual Framework*. Report prepared for US EPA Advisory Committee to Negotiate the disinfection By-products Rule. Washington, DC: 1993.

Trussell, R.R. *Control Strategy 1: Alternative Oxidants and Disinfectants*. Presentation at the 98<sup>th</sup> Annual American Water Works Association Conference. 1991.

US Environmental Protection Agency. *Status Report on Development of Regulations for Disinfectants and Disinfection By-products*. Washington, DC: 1991.

White, G.C. The Handbook of Chlorination, 2<sup>nd</sup> Ed. Nueva York: Von Norstrand Reinhold, 1986.