

"Documento original en mal estado"

**3. TIPOS DE DESINFECTANTES Y
METODOS DE DESINFECCION**

En esta sección se trata principalmente de los desinfectantes más comúnmente utilizados o que tienen un buen potencial para usarse en América Latina y el Caribe, pero también se examinan varios métodos menos usuales y procesos de menor importancia con objeto de responder a las consultas más frecuentes relacionadas con su eficacia y empleo. De este modo se espera facilitar la tarea de seleccionar los sistemas de desinfección más apropiados para pueblos pequeños y comunidades rurales.

En la práctica no existe un desinfectante ideal, uno que se desempeñe óptimamente en todas las circunstancias. Cada desinfectante tiene sus ventajas y desventajas, puntos fuertes y limitaciones, así como un conjunto específico de condiciones que tienen que cumplirse para que los resultados sean óptimos. Los problemas de selección surgen cuando un desinfectante no es idóneo para una situación específica, porque sus ventajas no son realmente importantes dadas las condiciones prevalecientes o porque predominan sus aspectos débiles. Por ejemplo, es fundamental que los requerimientos de logística de un método de desinfección no excedan la capacidad de la infraestructura de apoyo, y que la operación y mantenimiento no sean demasiado complejos para una operación sostenida. Los desinfectantes y el equipo de desinfección se deben seleccionar de modo que satisfagan en lo posible las condiciones específicas de la aplicación a que se destinan, y se deben tener en cuenta todos los factores que influyen en la fiabilidad, continuidad y eficacia.

La mayoría de los desinfectantes empleados en los abastecimientos de agua pueden agruparse bajo las categorías siguientes:

- a) Oxidantes químicos
- b) Radiación
- c) Iones metálicos
- d) Calor

En la tecnología de desinfección del agua, la expresión "oxidantes" abarca varias sustancias. En el Cuadro 1 se muestra el potencial de oxidación, y el poder de oxidación relativo de diversas especies de oxidantes fuertes en base al potencial de oxidación del cloro = 1,00. Es preciso señalar que un oxidante fuerte no es necesariamente un buen desinfectante, como ocurre con el peróxido de hidrógeno, mientras un oxidante relativamente débil, como el yodo, puede ser muy eficaz.

Dado que la mayoría de las formas de cloro son desinfectantes muy eficaces y se utilizan en toda América Latina y el Caribe, estos se tratan primero, en la Sección 3.1. El ozono, uno de los oxidantes más potentes, también es un excelente desinfectante del agua. Aunque se descubrió hace muchos años, se ha empleado menos que el cloro en las Américas. Recientemente se ha renovado el interés en el ozono en esta Región, principalmente debido a la preocupación por el posible

desarrollo de trihalometanos en la desinfección del agua con cloro libre y debido a haberse revelado la presencia de microorganismos muy resistentes, como los quistes de *Giardia* y los oocistos de *Cryptosporidium*. El ozono se examina en la Sección 3.2.

CUADRO 1
Potencial de oxidación y poder relativo de oxidación
de especies de oxidantes fuertes con base en la referencia de Cloro = 1,00

Especies oxidantes	Potencial de oxidación (Voltios)	Poder relativo de oxidación
Flúor	2,87	2,25
Radical de hidroxilo	2,80	2,05
Oxígeno atómico	2,42	1,78
Ozono	2,07	1,52
Peróxido de hidrógeno	1,77	1,30
Radical de perhidroxilo	1,70	1,25
Permanganato	1,68	1,23
Dióxido de cloro	1,50	1,10
Acido hipocloroso	1,49	1,10
Cloro	1,36	1,00
Bromo	1,07	0,79
Acido hipoyodoso	0,99	0,73
Ión de hipoclorito	0,94	0,69
Yodo	0,54	0,40

En estudios y experiencias recientes con oxidantes mezclados (generados *in situ*) se ha demostrado que estos poseen una capacidad de desinfección igual o mayor que la del cloro. Por este motivo, los oxidantes mezclados generados *in situ* tienen buenas posibilidades para su utilización en comunidades pequeñas. Los aspectos de la desinfección con oxidantes mezclados se tratan en la Sección 3.3.

La radiación ultravioleta, que está volviendo a capacidad para desinfectar sin producir cambios físico agua tratada, se examina en la Sección 3.4. El yodo es desinfectante de emergencia durante períodos cort complementario en situaciones microbiológicamente dif en la Sección 3.5. El bromo y los iones metálico condiciones especiales, pero se consideran como desinfectantes experimentales de los abastecimientos de agua potable. Estos, junto con otros desinfectantes menores, se presentan en la Sección 3.6. El peróxido de hidrógeno y el permanganato de potasio, aunque son oxidantes fuertes, son desinfectantes débiles y, por consiguiente, no se consideran detalladamente.

3.1 CLORACION

Principios de la cloración

El cloro es uno de los desinfectantes de agua más antiguos y de uso común en la América Latina y el Caribe. Su primer uso consistió en controlar los malos olores del agua, pero para fines del siglo XIX comenzaba a aceptarse como desinfectante y para principios del siglo XX se empleaba con este fin en forma sistemática en las plantas de tratamiento de agua de los Estados Unidos, y de otros países.

Características del cloro

El cloro se encuentra a la venta en diversas formas relativamente sencillas de aplicar al agua. En general, es el desinfectante más económico y más común. Es un bactericida y virucida eficaz en la mayoría de las situaciones, y proporciona un residual que puede medirse fácilmente. Desde el punto de vista de la salud, la desinfección del agua es su uso principal. El residual de cloro en el agua desinfectada también ayuda a proteger el sistema de distribución contra la recontaminación microbiana, impide el recrudescimiento bacteriano y retarda el deterioro microbiológico de las tuberías y demás componentes del sistema. Además, debido al alto potencial de oxidación de algunas de sus especies, en circunstancias especiales también se utiliza para controlar los sabores y olores, así como para eliminar el hierro, el sulfuro de hidrógeno, el amoníaco y el color.

A la temperatura ambiente (20°C) y a la presión atmosférica, el cloro es un gas amarillo-verdoso de un olor característico pungente, soluble en agua hasta 7,29g/litro y a 0°C hasta 14,6 g/litro; pero, los cloradores de gas suelen funcionar con un vacío parcial recomendado que produce una solubilidad operativa máxima de cerca de 3,5 g/litro. A la presión atmosférica, el cloro gaseoso se comprime

fácilmente y se licúa a $-34,5^{\circ}\text{C}$, así como también a 21°C y $7,0\text{ kg/cm}^2$ de presión. Como gas, su densidad es 2,5 veces mayor que la del aire, y como líquido es 1,5 veces más pesado que el agua. Por debajo de $9,6^{\circ}\text{C}$ y a la presión atmosférica, el cloro gaseoso se convierte en hielo al entrar en contacto con la humedad (hielo de cloro). El cloro líquido se vaporiza fácilmente a la presión atmosférica y a temperatura ambiente. Un volumen de cloro líquido a 0°C se transforma en 457,6 volúmenes de gas a la temperatura y presión estándar.

Aunque el cloro gaseoso no es explosivo o inflamable en el aire, puede apoyar la combustión de materiales fácilmente oxidables, como el carbón y aún producir explosiones. El cloro gaseoso seco no ataca los metales ferrosos, las aleaciones ferrosas o el cobre. Es importante que el cloro gaseoso no contenga vapor de agua; el cloro gaseoso húmedo es sumamente corrosivo y destruye los metales ferrosos, incluyendo el acero inoxidable. Sólo el oro, el platino, el tantalio y el titanio no reaccionan con el cloro húmedo. La plata forma una capa del cloruro de plata, que es inerte. Se han elaborado materiales especiales (generalmente plásticos) para manejar las soluciones acuosas de cloro o cloro gaseoso húmedo. El cloro líquido destruye el cloruro de polivinilo (PVC) común, así como el caucho blando y duro.

Además del cloro gaseoso, se usan varios compuestos de cloro para desinfectar el agua, como los hipocloritos de sodio o calcio, el bióxido de cloro y las cloraminas. Estas últimas suelen formarse en el agua en presencia de amoníaco, pero también se pueden añadir como producto químico preformado.

Efectos sobre la salud

Para los seres humanos y los animales, el cloro gaseoso es sumamente tóxico cuando se inhala. A bajas concentraciones, los efectos del cloro son alguna irritación de los ojos y las vías respiratorias superiores.

El umbral del olor irritante del cloro oscila entre $0,06$ y $5,8\text{ mg/m}^3$ ($0,02$ a $2,0\text{ ppm}$), según la sensibilidad de las personas y otros factores. La concentración máxima admisible en el ambiente de trabajo varía de un país a otro, de 1 a 3 mg/m^3 ($0,344$ a $1,032\text{ ppm}$) en el aire. Para la población en general se ha propuesto que si la irritación sensorial y la reducción en capacidad ventilatoria son los efectos críticos, los niveles deben ser inferiores a $0,1\text{ mg/m}^3$ ($0,034\text{ ppm}$). Sin embargo, se previene que este nivel debe utilizarse con cuidado en vista de las limitaciones inherentes de los datos. A concentraciones entre $2,9$ y $5,8\text{ mg/m}^3$ ($1,0$ a $2,0\text{ ppm}$), el cloro gaseoso se convierte en un problema, y a $11,6\text{ mg/m}^3$ ($4,0\text{ ppm}$) se hace intolerable (23). Esta última es la concentración máxima que puede respirarse durante una hora sin efectos serios. Pero es necesario anotar que se conoce poco

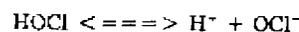
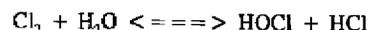
sobre la concentración umbral de letalidad humana. A manera de orientación se considera que las concentraciones de 116 a 175 mg/m³ (40 a 60 ppm) son peligrosas si se respiran durante 30 a 60 minutos, y las concentraciones de 2.900 mg/m³ (1.000ppm) en adelante pueden ser fatales después de aspirarlas profundamente unas pocas veces. En soluciones fuertes el cloro es irritante cuando entra en contacto con la piel. El cloro licuado puede causar quemaduras graves.

En el agua el cloro por sí solo no parece ser carcinogénico, mutagénico o teratogénico para los animales. En las concentraciones empleadas en la desinfección del agua, es inocuo; sin embargo, el cloro en presencia de algunos compuestos orgánicos puede formar trihalometanos (THM) que pueden tener posibles efectos adversos sobre la salud. El sabor y el olor del cloro pueden comenzar a desarrollarse a alrededor de 1,0 mg/litro en agua destilada, pero algunos compuestos del cloro, como los clorofenoles, tienen un umbral de sabor y olor mucho más bajo. En la Sección 4 se examinan los THM y otros subproductos de la desinfección.

Química de la cloración

Cloro gaseoso

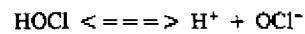
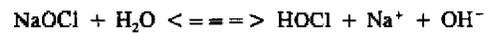
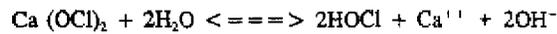
El cloro gaseoso y el agua reaccionan para formar ácido hipocloroso (HOCl) y ácido clorhídrico (HCl). A su vez, el HOCl se disocia en el ión de hipoclorito (OCl⁻) y el ión hidrógeno (H⁺), conforme a las reacciones siguientes:



Las reacciones son reversibles y las concentraciones relativas de los reactivos y los productos dependen del valor pH de la solución. Entre los valores pH de 3,5 y 5,5, el HOCl es la especie predominante. De alrededor de 5,5 a 9,5, las especies de HOCl y OCl⁻ existen en proporciones variables, mientras que por encima de 9,5, el OCl⁻ predomina totalmente. La Figura 6 muestra el efecto del pH en las concentraciones de los componentes HOCl y OCl⁻ (24). En solución acuosa, el cloro molecular existe sólo a valores de pH muy bajos. Las especies HOCl y OCl⁻ se designan comúnmente como cloro libre.

Hipocloritos

Otras formas de cloro generalmente utilizadas en la desinfección del agua son los hipocloritos de calcio y sodio. Cuando se agregan al agua estas sales sumamente solubles de ácido hipocloroso, pueden ocurrir las reacciones siguientes:



El pH de la solución determinará las proporciones de HOCl y OCl⁻, como se indica en la Figura 6. El cloro gaseoso tiende a reducir el pH del agua, mientras que los hipocloritos tienden a aumentarlo.

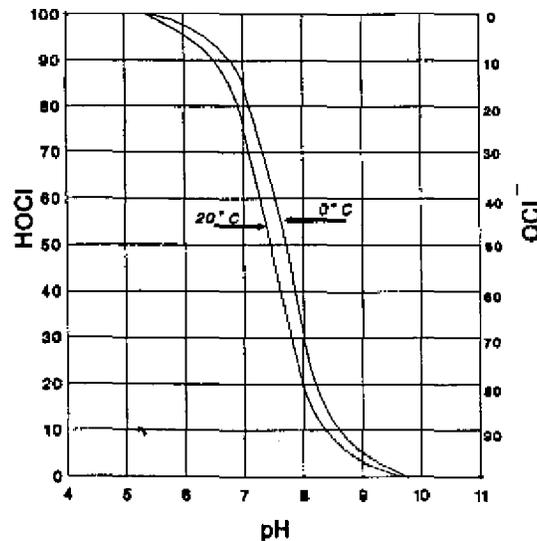


FIGURA 6

Efecto del pH en la proporción de especies de HOCl y OCl⁻ (24)

El hipoclorito de calcio puede contener hasta 70% de cloro disponible, pero por razones de seguridad se produce generalmente con un contenido del 65%. Los que tienen esas concentraciones de cloro en América Latina se denominan "HTH" que es en realidad un acrónimo inglés para "high test hypochlorite". En muchos países también se produce hipoclorito de calcio con una concentración del 35% de cloro disponible. Ambos se venden con una variedad de nombres. La forma más común es un polvo granular sumamente corrosivo, blanco con un fuerte olor a cloro. También puede obtenerse en tabletas y gránulos o píldoras. El envase usual del HTH son barriles de 25 a 50 kg, o latas para cantidades más pequeñas. El barril debe ser resistente a la corrosión. El hipoclorito de calcio puede ser más fácil de manejar que el cloro gaseoso para comunidades pequeñas; sin embargo, el almacenamiento adecuado del hipoclorito de calcio también es igualmente importante para evitar el peligro de incendios y explosiones.

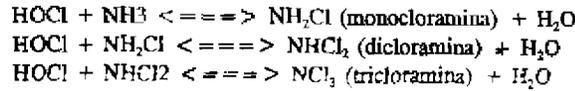
El hipoclorito de sodio generalmente se vende en forma de solución, en una concentración que varía entre el 2,5% y el 15% de cloro disponible (la concentración más común es 10%), envasado en plástico o botellas de vidrio de diversos tamaños y con diferentes nombres comerciales. A concentraciones más altas pierde potencia rápidamente. En algunos casos puede añadirse a un abastecimiento de agua a la potencia comercial, pero generalmente se diluye. El hipoclorito de sodio cristalino raras veces se emplea en la desinfección de agua.

La cal clorada a menudo se produce localmente en América Latina y puede tener un contenido de cloro de hasta el 35%, aunque por lo general, suele ser menor. Su potencia puede variar considerablemente de un país a otro. Además, con frecuencia contiene materias extrañas excesivas, causando problemas operativos en los dispositivos de dosificación. La cal clorada generalmente se envasa en barriles de 45 kg o mayores. Cuando viene en bolsas plásticas, debe tenerse extremo cuidado en su manejo y almacenamiento para evitar que se rompan y surjan situaciones inseguras.

El conocimiento de las características indicadas, así como de que todos los compuestos de hipoclorito pierden potencia durante el almacenamiento, especialmente si están expuestos al aire y la luz solar, son consideraciones importantes en la preparación de soluciones para la dosificación de cloro. Tanto el hipoclorito de calcio como el de sodio son mucho más costosos que el cloro gaseoso.

Cloraminas

Si existe amoníaco en el agua, o si se agrega intencionalmente, el cloro puede reaccionar con éste formando monocloraminas, dicloraminas o tricloraminas:



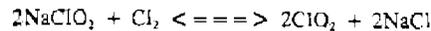
La proporción relativa de las monocloraminas y dicloraminas depende de la tasa de reacción, que es una función del pH y la relación $\text{Cl}_2:\text{NH}_3$. El cloro también reacciona con otras sustancias, formando diversos compuestos. Algunos de estos tan sólo usan cloro para su oxidación, mientras que otros tienen cierta capacidad de desinfección y otros pueden ser objetables.

Las cloraminas son desinfectantes mucho menos eficaces que el cloro libre. Este en realidad puede ser de dos órdenes de magnitud más eficaz que las cloraminas. La dosificación de amoníaco para formar cloraminas es una operación adicional que puede aumentar el costo de la desinfección y hacer más complejos los procesos operacionales.

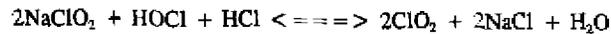
El uso de las cloraminas ha vuelto a atraer interés en vista de la inquietud por la formación de trihalometanos que podría resultar del uso de cloro residual libre; sin embargo, las cloraminas son desinfectantes tan débiles que requieren un tiempo de contacto prolongado o dosificaciones mayores. También hay que agregar amoníaco al agua cuando éste no está presente, lo que además de complicar las operaciones hace que este proceso sea más costoso para pequeños suministros de agua. Por lo tanto, las cloraminas son más apropiadas como desinfectante secundario, en lugar de primario.

Bióxido de cloro

La reacción del clorito de sodio con el cloro es importante en la desinfección del agua porque produce bióxido de cloro, un fuerte oxidante con características microbicidas potentes:



En condiciones ácidas, la reacción es la siguiente:



El bióxido de cloro es un buen desinfectante, pero como es mucho más costoso que el cloro, raras veces se emplea para desinfectar solamente. Debido a sus cualidades de oxidación, generalmente se aplica donde se requiere mejorar la

calidad del agua, además de desinfectarla. Por ejemplo, puede mejorar el sabor y el olor, y para destruir sustancias orgánicas. Como el cloro se genera en el sitio, debido a la complejidad y los riesgos que conlleva su producción y manejo, generalmente no se recomienda usarlo en cantidades pequeñas.

Eficacia del cloro como desinfectante del agua

Aún después de muchos años de estudio, no se comprende del todo el mecanismo exacto mediante el cual el cloro desinfecta. Una teoría comúnmente aceptada es que el ácido hipocloroso puede penetrar la pared de las células bacterianas, destruyendo su integridad y permeabilidad y, al reaccionar con grupos sulfhidrílicos, inactiva las enzimas esenciales para el proceso metabólico, matando al microorganismo. Esto ayuda a explicar por qué el HOCl, una molécula neutral pequeña, es un desinfectante mucho mejor que el ión de OCl^- , que debido a su carga negativa no penetra fácilmente la pared de las células.

Cualquiera que sea el mecanismo del proceso, desde el punto de vista práctico, existen dos técnicas de cloración: cloración residual combinada —cuando el cloro residual que queda en el agua después de un período específico, se halla en forma de cloraminas o de compuestos orgánicos; y la cloración residual libre —cuando el cloro residual se encuentra ya sea en forma de HOCl o de OCl^- . Estas dos formas de cloro residual producen diferentes reacciones en los microorganismos. En todo caso, la consideración principal siempre deberá ser la eficacia con respecto a la inactivación de los microorganismos patógenos que pueden encontrarse en el agua que se va a desinfectar. En este contexto, la consideración del efecto del valor del pH y la temperatura del agua, el tipo y la concentración del compuesto de cloro, la presencia en el agua de amoníaco y otras sustancias que reaccionan con el cloro, el tiempo de contacto del cloro con el agua, y el método de aplicación del cloro, son esenciales para determinar la eficacia.

La eficacia del cloro contra los principales microorganismos patógenos presentes en el agua se resume brevemente en los párrafos siguientes:

Bacterias

La eficacia del cloro contra las bacterias ha sido estudiada extensamente. Existe consenso general de que las salmonellas, las shigelas, los vibriones y la mayoría de las bacterias intestinales son más susceptibles a la cloración que el microorganismo indicador *Escherichia coli*. Por consiguiente, la *E. coli* se considera

un buen indicador de la contaminación bacteriana del agua. También existe acuerdo general sobre el hecho de que el cloro residual libre es casi 100 veces más eficaz que los residuales de cloro combinados. El cloro residual libre de 0,2 a 0,5 mg/litro se considera adecuado para la desinfección bacteriana del agua en la mayoría de las situaciones.

En conclusión, los agentes patógenos bacterianos en el agua pueden controlarse eficazmente mediante la cloración fiable y el mantenimiento de niveles residuales apropiados en el sistema de distribución, es decir, del orden de 0,2-0,5mg/litro de cloro libre, siempre y cuando se utilicen fuentes de agua bastante limpia (6), o sea, con turbidez menor de 1 UTN.

Esta conclusión es importante ya que agentes bacterianos son responsables de hasta el 45% de los casos de diarrea en los niños de países en desarrollo; y la diarrea del viajero, de común ocurrencia en la mayoría de los países, que la causa principalmente la *E. coli* enterotoxígena. Igualmente, el *Vibrio cholerae*, que es el causante de la reciente epidemia en América Latina con más de 950,000 casos y más de 9000 defunciones entre enero de 1991 y diciembre de 1993, es susceptible al cloro. Esta conclusión también se aplica a otras enfermedades intestinales bacterianas.

Especies virales

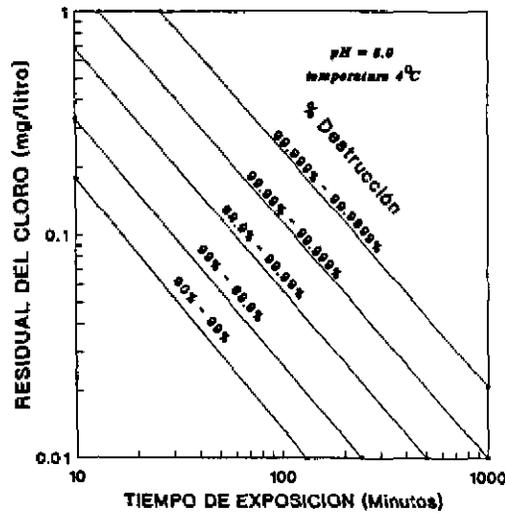
Los virus generalmente asociados con el agua potable son los rotavirus, los de la hepatitis, de la poliomielitis 1 y 2, de Coxsackie y los ecovirus. En general, se considera que los virus son más resistentes a temperaturas más altas y pH bajo. También acusan grandes variaciones en la resistencia a diferentes desinfectantes. Se cree que los rotavirus son la causa principal de diarrea en los niños de todo el mundo. El virus de la hepatitis infecciosa es de especial importancia epidemiológica porque es endémico en la mayoría de los países de la Región. Generalmente es transmitido por la vía fecal/oral y con frecuencia es transportado por el agua. También es resistente al cloro en dosis normales, y debido a su pequeño tamaño, puede pasar por los medios convencionales de filtración del agua.

Aunque recientemente se ha avanzado mucho en las técnicas de aislamiento y cultivo del virus de la hepatitis A, existen pocos estudios nuevos sobre la resistencia a diversos desinfectantes y la cuestión de la resistencia efectiva al cloro no parece haberse aclarado completamente. Wilson y Sobsey (25) notifican experimentos que los han llevado a la conclusión de que dos cepas de hepatitis A fueron en general más sensibles al cloro que la poliomielitis 1 y el ecovirus 1,

habiéndose obtenido una reducción de 10⁶ a 5,0 mg/litro a 5°C, así como de 10⁶ a 10² respectivamente. La inactivación de los virus depende de los rangos de pH. El pH, la temperatura y la eficiencia vírica del desinfectante. A pH 9,5, el pH tuvo poca influencia. Se necesita información para precisar mejor los resultados.

Actualmente se acepta que la floculación, y la filtración convencionales bien efectuadas eliminan un porcentaje sustancial de los virus que puedan estar presentes en el agua. Robeck et al. (26) indican que se puede lograr la remoción del 99,7% del poliovirus 1 por medio de estos procesos. Durante mucho tiempo se ha sabido que diferentes virus presentan distintas resistencias al cloro libre. Por ejemplo, el adenovirus 3 es menos resistente que la *E. coli*, mientras que el poliovirus 1 y el virus Coxsackie A2 y A9 parecen ser más resistentes que otros enterovirus estudiados (27). Bauman y Ludwig (8) sugirieron que las dosificaciones de cloro requeridas para inactivar los virus de Coxsackie, que son más resistentes al cloro que otros enterovirus, pueden usarse como una guía para la desinfección de los abastecimientos pequeños no públicos de agua.

Es difícil si no imposible establecer la combinación dosis/tiempo de exposición para todas las situaciones. La concentración del cloro en el agua y la duración de la exposición del agua al desinfectante depende del porcentaje de destrucción viral deseado y del pH y la temperatura del agua (28). La Figura 7 muestra concentraciones de cloro residual y tiempos de exposición para la destrucción del poliovirus 1 y los virus Coxsackie A2 y A9 a temperaturas superiores a 4°C y valores de pH inferiores a 8,0 en agua de una calidad dada. A razón de 0,1 mg/litro, la tasa de destrucción sería del 99% al 99,9% con una exposición aproximada de 30 minutos; y a 0,4 mg/litro, del 99,99% al 99,999% después de 30 minutos de exposición.



Fuente: Chang (1968)

FIGURA 7

Concentraciones de cloro residual y tiempos de exposición requeridos para destruir poliovirus 1 y virus Coxsackie A2 & A9 a temperaturas superiores a 4°C y valores pH inferiores a 8,0 (28)

El Grupo Científico de la OMS sobre los Virus Humanos en el Agua, las Aguas Residuales y el Suelo, 1979 (29), opinó que los suministros de agua derivados de fuentes contaminadas por virus siempre deben desinfectarse, ya que otros procesos por sí solos no son adecuados en todas las circunstancias para producir agua potable. También declaró que los procesos de desinfección bien operados pueden destruir los virus eficientemente, por ejemplo, con residuales de cloro libre disponible de 0,5 mg/litro con un tiempo de contacto de 30-60 minutos o con un residual de ozono de 0,2-0,4 mg/litro durante 4 minutos. Los estudios llevados a cabo por Bersh y Osorio (1) tienen considerable valor práctico, ya que en condiciones de campo han demostrado la eficacia del cloro con respecto a la reducción de la incidencia de la diarrea, cuando los residuales de cloro libre se mantienen continuamente por encima de 0,5 mg/litro y preferentemente de 0,7 mg/litro en el abastecimiento de agua.

Según Chang (28), se necesita a un grado apropiado para la cloración concentraciones del ión de amonio,

Se recomienda que, para ser efectivos contra los virus infecciosos para el hombre. Esto requiere que el agua esté contaminada por aguas servidas y que la fuente afectada por la contaminación sea una

En el Cuadro 2 se resumen las recomendaciones para los tratamientos necesarios para diferentes clases de fuentes de agua, para producir agua con un riesgo insignificante debido a virus.

La idoneidad del tratamiento no se puede estimar en un sentido absoluto, pues ni las técnicas de vigilancia disponibles ni la evaluación epidemiológica son suficientemente sensibles para garantizar la ausencia de virus.

El límite de turbiedad debe alcanzarse antes de la desinfección para lograr que el tratamiento sea eficiente. Puede aplicarse otro tipo de desinfección que no sea la cloración siempre que su eficacia no sea inferior a la de este procedimiento, tal como se anotó anteriormente. Se ha demostrado que el ozono es un desinfectante viral eficaz, de preferencia para agua limpia, si se mantienen residuales de 0,2-0,4 mg/litro durante 4 minutos. El ozono ofrece ciertas ventajas sobre el cloro para tratar agua que contiene amoníaco pero, lamentablemente, no es posible mantener una concentración de ozono residual en el sistema de distribución.

Cuando se cuenta con los recursos necesarios para efectuar análisis virológicos, es conveniente examinar la fuente de agua natural y el agua ya sometida a tratamiento para detectar la posible presencia de virus. Se obtendrán así datos de referencia que permitirán estimar los riesgos para la salud que encara la población. Es preciso utilizar un método de referencia para determinar la presencia y concentración de virus en grandes volúmenes de agua potable (por ejemplo, de 100-1000 litros) (30).

Estas consideraciones son sumamente importantes, ya que se estima que para una gran variedad de virus de origen humano, incluyendo los enterovirus, una sola unidad vírica infecciosa puede producir infección en el hombre (29).

CUADRO 2
Tratamientos recomendados para diferentes fuentes a fin de
producir agua con riesgo viral insignificante^a (6)

Tipo de fuente	Tratamiento recomendado
Aguas subterráneas	
Pozos profundos protegidos; esencialmente libres de contaminación fecal	Desinfección ^b
Pozos superficiales no protegidos; contaminación fecal	Filtración y desinfección
Aguas superficiales	
Aguas embalsadas protegidas en tierras altas; esencialmente libres de contaminación fecal	Desinfección
Aguas embalsadas o río en tierras altas no protegidos; contaminación fecal	Filtración y desinfección
Ríos no protegidos en tierras bajas; contaminación fecal	Desinfección previa o almacenamiento, filtración, desinfección
Cuenca hidrográfica no protegida; contaminación fecal considerable	Desinfección previa o almacenamiento, filtración, tratamiento suplementario y desinfección
Cuenca hidrográfica no protegida; contaminación fecal manifiesta	No se recomienda su utilización para el abastecimiento de agua potable

^a Para todas las fuentes, antes de la desinfección final no se debe superar una mediana de turbiedad de 1 unidad nefelométrica (UNT) ni 5 UNT en muestras aisladas.

La desinfección final debe producir una concentración residual de cloro en estado libre de $\geq 0,5$ mg/litro tras 30 minutos por lo menos de contacto con el agua a un pH $< 8,0$ o debe ser un proceso de desinfección equivalente en cuanto al grado de inactivación de los enterovirus ($> 99,99\%$).

La filtración debe realizarse lentamente con arena o rápidamente (con arena, un medio doble o un medio mixto) y debe ir precedida por suficiente coagulación-floculación (con sedimentación o flotación). Puede utilizarse también la filtración con tierra de diatomáceas o un proceso de filtración equivalente en cuanto a la reducción de los virus. El grado de reducción de éstos debe ser $> 90\%$.

El tratamiento suplementario puede consistir en filtración lenta con arena, ozonación con adsorción por carbón granular activado o cualquier otro que permita obtener una reducción de los enterovirus $> 99\%$.

^b La desinfección debe efectuarse si se ha observado la presencia de *E. coli* o de bacterias coliformes termoresistentes.

Protozoos

En los países en desarrollo, la amibiasis es proporcionalmente menos frecuente que en los países desarrollados, pero es considerable por lo que no deben ignorarse. *Entamoeba histolytica* es de interés en los países latinoamericanos. En todos los países de la Región, percibe una prevalencia de amibiasis en el 56% de la población; sin embargo, es rara, pero en los lugares donde existe una buena indicación de condiciones anti-higiénicas, como en las epidemias de amibiasis, cuando se han producido una gran cantidad de quistes por la contaminación del agua potable con aguas residuales (21). El potencial para la propagación de la enfermedad es muy alto, ya que una persona infectada produce unos 14.000.000 de quistes por día, siendo cada quiste una fuente potencial de infección (31).

La capacidad de desinfección del cloro en relación con los quistes de *Entamoeba histolytica* ha sido investigada ampliamente. Chang (32), por ejemplo, encontró que los quistes de amebas eran 160 veces más resistentes al HOCl que el *E. coli* y 9 veces más que los virus más fuertes. El HOCl destruyó los quistes en 10 minutos a 25°C, con un residual de 3,5 ppm. Con un pH de 4,0, 30°C y 10 minutos de exposición, hubo que utilizar 2,0 mg/litro de cloro residual libre para obtener una reducción del 99,9% de los quistes; con un pH de 10, se necesitaron 12,0 mg/litro de cloro para la misma reducción logarítmica.

Los quistes de *Giardia lamblia* han suscitado mucho interés en los últimos años debido a su persistencia en abastecimientos de agua clorada que no había sido filtrada previamente. Se considera que los quistes de este parásito figuran entre los agentes patógenos más resistentes a la desinfección. También pueden haber problemas con la inactivación del *Cryptosporidium* y el *Balanitidium*; es por lo tanto preciso investigar más a fondo estos y otros protozoos.

En estudios sobre la "Inactivación de agentes microbianos por medio de desinfectantes químicos" Hoff (7) resume los valores de C·t para la inactivación del 99% de diversos microorganismos mediante tres especies de cloro, a 5°C.

El Cuadro 3 ilustra la eficacia microbicida del cloro libre, la cloramina y el bióxido de cloro. Puede observarse que las cloraminas son desinfectantes relativamente débiles. Además, el cuadro muestra que los quistes de *Giardia* son muy resistentes al cloro libre y al bióxido de cloro. (No se recomienda utilizar el cuadro para estimar los valores de C t para niveles de inactivación más altos).

CUADRO 3

Resumen de intervalos de valor C·t para inactivar el 99% de diversos microorganismos mediante la desinfección a 5°C (7)

Microorganismos	Valores C·t del desinfectante		
	Cloro libre pH 6 a 7	Cloramina preformada pH 8 a 9	Bióxido de cloro pH 6 a 7
<i>E. coli</i>	0,034 - 0,05	95 - 180	0,4 - 0,75
Poliomielitis I	1,1 - 2,5	768 - 3740	0,2 - 6,7
Rotavirus	0,01 - 0,05	3806 - 6476	0,2 - 2,1
Fago 2	0,08 - 0,18	-	-
Quistes de <i>G. lamblia</i>	47 - 150	-	-
Quistes de <i>G. muris</i>	30 - 630	-	7.2 - 18.5

Utilizando los procesos de tratamiento de agua de acuerdo a los criterios bacteriológicos y la aplicación de tratamientos para la reducción de virus se puede asegurar que el agua tenga un riesgo insignificante de transmisión de enfermedades parasitarias (protozoarios), excepto en circunstancias de contaminación extrema con estos (6).

Esquistosomiasis

En 1988 se estimó que la población en riesgo en Brasil, Suriname y Venezuela era de 31,5 millones de personas (20). Aunque la esquistosomiasis no suele asociarse con el agua potable, debe observarse que la cloración puede eliminar este microorganismo. Se ha encontrado que el cloro libre es eficaz contra las cercarias de la esquistosomiasis en condiciones específicas. Frick y Hillyer (33) demostraron que a 20°C y con 30 minutos de contacto, residuales de 0,3 mg/litro con un pH de 5,0, de 0,6 mg/litro con un pH de 7,5 y de 5,0 mg/litro con un pH

de 10, inactivaron eficazmente cercarias de *Schistosoma mansoni*. Aunque el método principal del control de la esquistosomiasis consiste en limitar el contacto del hombre con el agua, el suministro de agua pura ha contribuido al control en varios países.

Consideraciones prácticas

Para un gran número de comunidades del tamaño considerado en este documento, la única línea de defensa contra las enfermedades transmitidas por el agua puede ser un sistema de desinfección. Incluso en pequeños abastecimientos de agua en los que se practica la coagulación, sedimentación y filtración, la desinfección desempeña una función muy importante. En efecto, la calidad del agua en sistemas pequeños es de gran importancia porque estos son los abastecimientos públicos de agua donde se experimenta la mayoría de los brotes de enfermedades transmitidas por el agua. Esto se debe generalmente al uso de agua no tratada de calidad dudosa, o a deficiencias en el tratamiento, especialmente en la filtración y desinfección.

Desde el punto de vista práctico, es importante tener alguna orientación sobre los niveles generales de los residuales de cloro que se deben mantener en el sistema de distribución.

En años recientes se ha prestado atención especial a la eliminación de quistes de *Giardia* mediante la filtración. Existen varios estudios sobre el tema. En general, hay consenso de que la sedimentación, la coagulación y la filtración bien efectuadas eliminan eficazmente los quistes de *Giardia*. Experimentos realizados por Becker y Lee (34) han eliminado >99,999% de los quistes de *Giardia* con filtros lentos de arena, y casi el 100% con filtración directa en medios de capa mezclada después de la adición y mezcla de productos químicos. Como promedio, la turbiedad del agua antes de tratar fue 0,33 UTN y la del agua tratada fue 0,15 o menos.

En lo referente a los protozoos, cuando se sospeche que las fuentes de agua contienen este tipo de agentes patógenos habrá que emplear pretratamiento adecuado para su remoción antes de la cloración. Este proceso deberá eliminar los quistes, y la cloración residual libre, controlada cuidadosamente, asegurará que el agua contenga un número mínimo de microorganismos patógenos.

Para que las fuentes de agua no tratada sean aceptables para el tratamiento sólo mediante desinfección, tienen que cumplir los mismos criterios que el agua sometida al tratamiento completo. El agua no tratada debe, por lo tanto, estar exenta

protozoos, no debe tener una demanda de cloro, y su turbidez ha de ser menor que 1 UTN.

El agua en el sistema de distribución se debe observar todos los días, de ser posible, para que los residuales de cloro sean adecuados. Las pruebas bacteriológicas para detectar coliformes totales y fecales se deben hacer rutinariamente por lo menos una vez al mes (6).

Es importante insistir en que cuando se trata con uno cualquiera de los procesos de tratamiento de aguas, incluyendo la desinfección, la eliminación o inactivación de microorganismos es una función del número de microorganismos originalmente presentes. Por esto si el agua está muy contaminada, todavía podría quedar viable un gran número de microorganismos en el agua tratada. Además, también tiene que haber seguridad de que se utiliza el tiempo de contacto necesario con un mezclado adecuado para garantizar que los microorganismos estén en contacto suficiente tiempo con el desinfectante a fin de asegurar su inactivación.

Medición de las concentraciones de desinfectante

Una consideración importante al seleccionar un desinfectante es que su concentración en el agua se debe poder medir con rapidez y facilidad en el campo. La cloración generalmente proporciona un residual fácilmente medible, lo que permite utilizar el resultado para ajustar la dosificación del proceso cuando sea necesario. El residual también proporciona una medida del desempeño del proceso de cloración.

Los niveles de cloro se pueden determinar por varios métodos. La mayoría de ellos se describen en el libro "Standard Methods" (30). El método de titulación amperimétrica se emplea en muchos casos en América Latina y el Caribe, en particular en los laboratorios de los sistemas más grandes de abastecimiento de agua. Este método mide el cloro residual libre y el total y puede diferenciar entre las mono y dicloraminas. Es sensible y exacto en la gama baja de dosificaciones; sin embargo, requiere condiciones de laboratorio y considerable habilidad y experiencia. No se recomienda su uso en comunidades pequeñas.

El método más utilizado en América Latina y el Caribe es el colorimétrico de DPD (N,N-dietilo-p-fenilenediamina). El DPD con un comparador es fácil de usar en condiciones de campo para determinar cloro residual libre o combinado. Un espectrofotómetro puede detectar 10 microgramos/litro. Tanto el método colorimétrico como el de titulación se describen en los "Procedimientos simplificados

para el examen de aguas" (35). Es preciso tomar precauciones en el análisis debido a las sustancias interferentes y el deterioro de los reactivos. El costo de los comparadores y los reactivos probablemente es un décimo del de los tituladores amperométricos.

Hay varios comparadores de color de bajo costo que están disponibles en el mercado o que se fabrican localmente, variando su precio entre EUA\$5,00 y \$12,00 (36). No son instrumentos de precisión, pero generalmente se calibran en incrementos de 0,2 mg/litro (cloro residual). Algunos emplean una forma líquida de DPD, que no se recomienda porque se ha demostrado que es muy inestable debido a su sensibilidad a la oxidación por el aire. Se recomienda el polvo seco o tabletas de DPD, ambos deben mantenerse sellados herméticamente hasta el momento de usarlos. Existen varios comparadores de color más precisos, graduados en incrementos de 0,05 mg/litro (cloro residual). Estos deben usarse cuando se deseen mediciones más exactas.

La prueba FACTS (Stringaldacina) es colorimétrica o espectrofotométrica y mide directamente las especies ($Cl_2 + HOCl + OCl^-$) de cloro libre (30). Las habilidades requeridas del operador son similares a las de la prueba de DPD, aunque la exactitud esperada es ligeramente menor. La estabilidad del color es más o menos igual al DPD (30 minutos). La vida útil de los reactivos del FACTS es más corta que la del DPD; además la prueba FACTS tiene la dificultad de disolver la stringaldacina en isopropanol y por esto su uso generalmente está limitado al laboratorio. No se utiliza para mediciones de cloro totales o combinadas.

Las Guías de la OMS, Vol. 3, 1985, para la calidad del agua potable (37) describen, en el Anexo 7, tres métodos para determinar el cloro: la técnica del comparador, la del tubo de ensayo y la del almidón y yoduro de potasio. En el Cuadro 4 se comparan los diversos métodos empleados en la prueba del cloro residual en el agua potable.

CUADRO 4
Comparación de los métodos para determinar el
cloro residual en el agua potable¹

Método	Aplicación			
	Ubicación	Total	Combinado	Libre
Yodométrico ²	Laboratorio	Sí	No	No
Amperométrico	Laboratorio	Sí	Sí	Sí
DPD				
Titulación	Laboratorio	Sí	Sí	Sí
Colorimétrico (fotómetro) ²	Laboratorio	Sí	Sí	Sí
Comparador de color ²	Campo	Sí	Sí	Sí
FACTS (Siringaldacina)	Laboratorio	No	No	Sí
Ortotolidina ^{2 3}	Campo	Sí	Sí	Sí

¹ La mayoría de los oxidantes fuertes (ozono, peróxido de hidrógeno, bromo y yodo) interfieren con las mediciones en todas estas pruebas.

² Los contaminantes orgánicos pueden producir una lectura de cloro falsa en los métodos colorimétricos.

³ Todos los métodos con Ortotolidinas fueron suprimidos de los "Standard Methods" después de la 14ª. edición debido a su exactitud deficiente y la naturaleza tóxica de la ortotolidina.

En América Latina y el Caribe todavía se sigue usando el método de la Ortotolidina, pero se está eliminando progresivamente debido a la inquietud generada por la carcinogenicidad del reactivo y la corta vida útil de éste.

REFERENCIAS

- (23) Organización Mundial de la Salud. Chlorine and hydrogen chloride. Environmental Health Criteria 21, IPCS. Ginebra; 1982.
- (24) Berg, G. Virus transmission by the water vehicle. III. Removal of virus by water treatment procedures. Health Laboratory Science, 3:3, pp 170-181; 1966. (Citado por Walton, G. "Water Treatment: Prevention of Water Borne Diseases". Actas de la 11a Conferencia de Ingeniería Sanitaria, febrero 1969, Universidad de Illinois, Urbana, Illinois).
- (25) Wilson, L.K. y M.D. Sobsey. Inactivation of hepatitis A virus by chlorine in water. AWWA Annual Conference Proceedings, Kansas City, MO. Junio 14-18. pp.447-462; 1987.
- (26) Robeck, G.G.; Clarke, N.A. y Dostal, K.A. Effectiveness of water treatment processes in virus removal. Jour. AWWA, October; 1962.
- (27) Kabler, P.W., Chang, S.L., Clarke, N.A. y Clark, H.F. Pathogenic bacteria and viruses in water. Actas, Quinta Conferencia de Ingeniería Sanitaria, Quality Aspects of Water Distribution Systems, enero 29-30, 1963; Universidad de Illinois, Urbana, Illinois.
- (28) Chang, S.L. Waterborne viral infections and their prevention. Boletín de la Organización Mundial de la Salud; 38, 401-414; 1968.
- (29) Organización Mundial de la Salud. Human viruses in water, wastewater and soil. Serie de Informes Técnicos No. 639. Ginebra; 1979.
- (30) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1992. 18th Edition. APHA, AWWA, WEF.
- (31) Stringer, R.P., Cramer, W.N. y Kruse, C.W. Comparison of bromine, chlorine and iodine as disinfectants for amoebic cysts, en "Disinfection: Water and Wastewater". Ann Arbor Science; 1975.
- (32) Chang, S.L. Modern concepts of disinfection. Actas de la Conferencia Nacional de Especialización en Desinfección, celebrada en la Universidad de Massachusetts en Amherst, julio; 1970.

- 33) Frick, L.P. Col. y Hillyer, G.V. The influence of pH and temperature on the cercaricidal activity of chlorine. Military Medicine, 131:372-378; 1966.
- 34) Becker, William, C. y Lee, R.G. Evaluation of in-line direct and slow sand filtration for turbidity and giardia removal. AWWA 1987 Annual Conference Proceedings, Kansas City, MO. Junio 14-18. pp.1621-1645.
- 35) Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud. Procedimientos simplificados para el examen de aguas. 1978.
- 36) Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Medidor de cloro residual de bajo costo para programas de vigilancia de la calidad del agua para consumo humano. Hojas de Divulgación N° 35, Lima, Perú; 1986.
- 37) Organización Mundial de la Salud. Guías para la calidad del agua potable, Vol. 3. Control de la calidad del agua potable en sistemas de abastecimiento para pequeñas comunidades, Ginebra; 1985.

3.2 OZONACION

Características del ozono

La primera detección de ozono tuvo lugar en 1785, cuando Van Marum, de los Países Bajos, notó un olor característico mientras trabajaba con su máquina electrostática para generar chispas eléctricas. En 1801, Cruickshank detectó el mismo olor en el gas generado en el ánodo durante la electrólisis del agua. En 1840, Schonbein postuló que el olor se debía a una nueva sustancia a la que él llamó ozono, a partir de la palabra griega *ozein* que significa "oler". El olor característico del ozono en el aire es detectado por el olfato a concentraciones tan bajas como 0,01 ppm.

El ozono es un gas alótropo del oxígeno, que combina tres átomos de este elemento, y se representa por el símbolo O₃. Su densidad es 1,5 veces la del oxígeno, y es 1,7 veces más pesado que el aire. La solubilidad del ozono en el agua es de 14 a 20 veces la del oxígeno. Como oxidante, ocupa el segundo lugar en potencial de oxidación (Cuadro 1) entre los productos químicos de fácil disponibilidad, siguiendo únicamente al flúor. A la temperatura y presión ambiente

es un gas inestable que se descompone rápidamente para volver a la molécula de oxígeno, O_2 , de la cual se formó. Debido a esta característica, no se puede almacenar o envasar, sino que debe generarse en el lugar y usarse inmediatamente.

En 1886 el francés de Mentens demostró por primera vez las propiedades germicidas del ozono. Este gas se ha empleado para muchos fines en los abastecimientos de agua desde sus primeras aplicaciones como desinfectante en Francia, Holanda y Alemania a comienzos del siglo XX. Por lo general suele utilizarse simultáneamente como oxidante y como desinfectante. Hoy en día existen más de 1.100 plantas de tratamiento de agua en todo el mundo que utilizan el ozono; sin embargo, su aplicación en América Latina ha sido muy limitada hasta el momento.

La gran mayoría de las instalaciones de ozonación se encuentran en ciudades grandes con fuentes de agua altamente contaminadas, y se han usado muy poco en las comunidades pequeñas. En vista de que la calidad de los recursos hidráulicos disponibles para abastecimiento de agua de las comunidades pequeñas se está deteriorando (debido a que no se tratan las aguas residuales, a la explosión demográfica y a los esfuerzos que se realizan para desarrollo económico e industrial), la ozonación cada vez resulta más aceptable como alternativa para el tratamiento de agua. Coincidentemente, se están produciendo instalaciones de ozonación de capacidad menor que son económicamente factibles, lo que permite su aplicación en comunidades pequeñas.

Técnicamente, la ozonación ciertamente ha sido ensayada y probada extensamente; sin embargo, para las comunidades con menos de 10.000 habitantes probablemente se debe considerar como un proyecto de demostración desde el punto de vista operativo, administrativo y de infraestructura. El inconveniente principal para las comunidades pequeñas ha sido el costo inicial y el de operación, seguido de las dificultades operacionales y de mantenimiento. Sin embargo, en circunstancias especiales, cuando todas las fuentes de agua accesibles están muy contaminadas (biológica y/o químicamente), puede ser el método más recomendable para la desinfección y oxidación primaria.

Efectos sobre la salud

El ozono en el aire que se respira constituye una verdadera amenaza para la salud, considerándose riesgoso a una concentración de tan solo 0,02 ppm. Como en la desinfección con ozono no se puede transferir todo el gas generado al agua que se está tratando, habrá ozono en el gas que escapa de la cámara de contacto, que se debe disponer de manera segura.