

"Documento original en mal estado"

Cuando hay presentes materiales orgánicos, la química se hace mucho más compleja y se acelera la descomposición del ozono. Con un potencial de oxidación de 2.07 voltios, el ozono teóricamente puede oxidar la mayoría de los compuestos orgánicos convirtiéndolos en bióxido de carbono y agua; pero como es selectivo en cuanto a las sustancias que oxida rápidamente la cinética de las reacciones del ozono con muchos compuestos será demasiado lenta para que resulte en la conversión de estos a bióxido de carbono durante el tratamiento de agua. Como casi siempre la demanda total de ozono excede su suministro, estas reacciones cesarán mucho antes de que todas las sustancias orgánicas se hayan oxidado totalmente. En el tratamiento de sustancias orgánicas, el ozono se ha usado principalmente para la ruptura de enlaces múltiples como tratamiento preliminar, antes de la filtración y como ayuda para la coagulación.

Recientemente se ha encontrado que cuando se combina el ozono con peróxido de hidrógeno y/o luz ultravioleta, es posible oxidar muchas sustancias orgánicas e inorgánicas más eficazmente que con ozono solo. Se cree que el éxito de estos procesos se debe a la mediación del radical hidroxilo (41). Estos procesos, junto con otros que generan el radical hidroxilo (como ozono a altos valores de pH y peróxido de hidrógeno con iniciadores radicales de hidroxilo metálico), suelen llamarse "procesos de oxidación avanzados". La química de estos procesos es bastante compleja y todavía no se comprende totalmente; de todos modos, este tema está fuera del alcance de este documento porque no es directamente pertinente a la desinfección del agua con ozono.

La importancia principal de los procesos de oxidación para la desinfección es que gran parte del ozono generalmente será consumido por otras sustancias que suelen estar presentes en el agua, y habrá que satisfacer esta demanda antes de asegurar la desinfección. También significa que el ozono no proporcionará un residual estable aunque sea un desinfectante primario excelente que logra la destrucción de los microorganismos. Por lo tanto habrá que añadir un desinfectante secundario para proporcionar ese residual a fin de proteger el agua en el sistema de distribución para que no vuelva a contaminarse o que no vuelvan a crecer los microorganismos. Por estas razones y debido a que el costo es relativamente alto, raras veces se emplea el ozono solamente para desinfectar, sino que más bien se usa cuando es necesario mejorar simultáneamente otros aspectos de tratamiento mediante su poder de oxidación.

Eficacia

Desde el punto de vista de la eficacia biocida, el ozono es el desinfectante más potente que se utiliza en los suministros de agua, siendo el producto $C t_{99}$ de la mayoría de los microorganismos menor de 1/10 del de HOCl o del bióxido de cloro.

Los tiempos de contacto y la concentración para inactivar o matar todos los agentes patógenos transmitidos por el agua son mucho más bajos que los del cloro libre o cualquier otro de los desinfectantes empleados en los abastecimientos de agua. El valor de $C \cdot t_{99}$ para el *E. coli* varía de 0,006 a 0,02 a 1°C y un pH de 7,2. Para el poliovirus 1, a 5°C y un pH de 7,2, los valores de $C \cdot t_{99}$ varían entre 0,1 y 0,2; a 20°C el valor medio de $C \cdot t_{99}$ es 0,05. Para el rotavirus, el valor de $C \cdot t$ a 4°C varía de 0,006 a 0,024, reflejando el valor más bajo un pH de 6, y el valor más alto un pH de 9. Para los quistes de *G. muris* a 5°C, el valor se ha determinado en 1,94. La capacidad de desinfección del ozono no cambia gran cosa en el intervalo normal del pH de los abastecimientos de agua (42). En el Cuadro 5 se compara la resistencia de diferentes microorganismos al ozono. Incluso el quiste de *Naegleria gruberi*, uno de los microorganismos más resistentes a la desinfección, tiene un valor $C \cdot t_{99}$ de tan solo 4,23 a 5°C.

CUADRO 5
Comparación de la resistencia de diferentes microorganismos a la inactivación con ozono

Organismos	pH	Temp. °C	C mg/L	t min.	C·t m·g min./L	Referencias
<i>Escherichia coli</i>	7,2	1	0,07	0,083	0,006	Katzencelson et al.
	7,2	1	0,065	0,33	0,022	
<i>Mycobacterium fortuitum</i>	7,0	24	0,8-1,08	0,58	0,53	Farouq et al.
Coxsackie A9	7,2	20	0,15	0,12	0,018	Roy et al.
Poliovirus 1	7,2	20	0,15	0,5	0,075	Roy et al.
	7,2	5	0,15	1,47	0,22	
Poliovirus 2	7,2	20	0,15	4,83	0,725	Roy et al.
<i>Giardia muris</i>	7,0	25	0,03-	9,0-1,8	0,27	Wickramanayake
	7,0	5	0,15-0,15-0,7	12,9-2,8	1,94	
<i>Naegleria gruberi</i>	7,0	25	0,3-1,2	4,3-1,1	1,29	Wickramanayake
	7,0	5	0,55-2,0	7,8-2,1	4,23	
<i>Entamoeba histolytica</i> (quiste)	7,5-8,0	19	0,7-1,1	<5	-	Newton et al.

El ozono tiene dos limitaciones importantes como desinfectante único: su vida media en el agua generalmente es menos de 1/2 hora y además reacciona con sustancias orgánicas para producir derivados de peso molecular inferior, que son más biodegradables que sus precursores. Sontheimer (43) encontró que la aplicación de 1 mg/litro de O_3 al agua con 1,0 mg/litro de carbono orgánico disuelto dió lugar a la conversión del 75% del carbono orgánico disuelto (COD) en compuestos biodegradables y 2,0 mg/litro de O_3 dió lugar a una conversión del 90%; en consecuencia, la ozonación podría resultar en un nuevo crecimiento microbial en el sistema de distribución porque descompone las sustancias orgánicas y las convierte en formas que los microorganismos que se encuentran comúnmente en los sistemas de distribución pueden utilizar como nutrientes. Debido a estas dos limitaciones, el ozono suele usarse en combinación con otros desinfectantes (desinfectantes secundarios) con residuales más débiles pero más duraderos, para impedir el nuevo crecimiento de microorganismos en el sistema de distribución. La capacidad del ozono para reaccionar con sustancias orgánicas puede aprovecharse para eliminar los compuestos convertidos que se han hecho biodegradables mediante una filtración subsiguiente a la ozonación.

Otra consideración es que, del mismo modo que con otros desinfectantes, para que sea eficaz el ozono debe entrar en contacto con los microorganismos; la agrupación de estos podría proteger a algunos. Igualmente, la distribución inadecuada del desinfectante puede no poner a los microorganismos en contacto con el ozono antes de que se disipe.

Desde el punto de vista económico, el uso más favorable del ozono parece ser cuando, además de la desinfección, se emplea simultáneamente para otros fines en el tratamiento de agua, como descomponer sustancias orgánicas sintéticas, eliminar fenoles, evitar la formación de trihalometanos, mejorar la floculación y para otras funciones similares. Tal como se indicó con anterioridad, el ozono es un oxidante tan fuerte que casi siempre se utiliza con propósitos múltiples en el tratamiento de suministros de agua, en lugar de usarlo solamente como desinfectante.

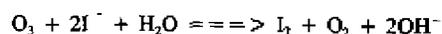
Determinación de la concentración de ozono

La monitoría y la prueba para detectar el ozono incluyen algo más que la simple vigilancia del residual en el sistema de distribución de agua. También es preciso vigilar el gas que escapa de la cámara o cámaras de contacto para asegurar que no se está desperdiciando ozono y que se ha aplicado una cantidad suficiente para obtener la oxidación/desinfección deseada. Además es necesario controlar el

ozono en el agua tratada, para que la tasa de producción se pueda ajustar a los cambios en la calidad de agua afluente. Esto es particularmente importante si el agua no ha sido tratada adecuadamente antes de la ozonación, a fin de estabilizar suficientemente la demanda de ozono: la vigilancia continua es necesaria para proporcionar un tratamiento fiable con el ozono.

Se han usado varias pruebas para detectar el ozono. La más sencilla, pero anticuada, que se utilizaba en las plantas europeas más pequeñas, y más viejas, para vigilar el ozono era la prueba del "olfato", que se basaba en el hecho de que el nivel umbral de detección nasal del ozono en el aire era aproximadamente 0,01 ppm. Se empleó para asegurar que el gas que escapa de los contactores todavía contenía ozono. Esto no es fiable ni exacto, y también es peligroso; por eso no se recomienda incluso para las instalaciones pequeñas.

El método de yoduro de potasio descrito en los "Standard Methods" (30) entraña la oxidación del ión de yoduro (I^-) en el agua a yodo (I_2), según la ecuación:



La solución resultante luego se titula con tiosulfato de sodio usando almidón como indicador. Lamentablemente, otros oxidantes, como el cloro, el bióxido de cloro, el peróxido de hidrógeno y el permanganato de potasio, que son capaces de oxidar el ión de yoduro, interfieren en la prueba. Por esto, y porque la prueba es tediosa y lenta, resulta más práctica como método estándar para la calibración de dispositivos de detección de ozono, y no para prueba de rutina.

El método de trisulfonato de índigo (44) tiene ventajas en el sentido de que se basa en la medición de la decoloración a este compuesto, la que es rápida y estequiométrica. Sus atributos primarios son su sensibilidad, selectividad, exactitud y sencillez. Si se agrega ácido malónico a la muestra, se reduce la interferencia del cloro. El procedimiento de ADG-IF (gas-diffusion-flow-injection analysis) es muy fiable pero hay que hacerlo en el laboratorio y no se presta para pruebas en el campo.

Otro método satisfactorio de medición del ozono en el agua es con instrumentos de tipo amperométrico que usan una celda de medición de flujo continuo de dos electrodos metálicos diferentes (a menudo de oro y cobre) para generar una corriente proporcional al ozono presente. Estos electrodos se utilizan

actualmente en los sistemas de vigilancia y control automatizados de la ozonación en plantas de tratamiento de agua. Su inconveniente principal es la necesidad de calibrar y limpiar frecuentemente los electrodos, que se pueden contaminar.

La absorción de la radiación de rayos ultravioletas de longitudes de onda entre 240 y 300 nm se puede utilizar para determinar el contenido de ozono, tanto en el aire como en el agua. Las lámparas con una longitud de onda de 254,7 nm se utilizan mucho para estos fines. Los dispositivos que emplean este método, junto con instrumentos espectrofotométricos de haz doble, se utiliza para la vigilancia continua del ozono tanto en el agua tratada como en el gas que escapa de la cámara de contacto. Este equipo suele emplearse en los sistemas de control automatizados y computarizados que ajustan la producción del ozono para armonizarla o ajustarla a los cambios en la calidad del agua a medida que estos ocurren, a fin de asegurar una oxidación-desinfección adecuada y reducir al mínimo el exceso de ozono en el gas que escapa. Hay concordancia en cuanto a la absorción molar de los rayos ultravioleta por el ozono gaseoso. La exactitud de la medición de la absorción del ozono en solución acuosa todavía sigue siendo algo incierta, dando valores que varían de cerca de 2900 a 3600 Langleys por centímetro de penetración por molar de ozono.

Aunque en base a la monitoria del residual de ozono se pueden hacer ajustes manuales a la dosificación, esto no es práctico, excepto en el caso de una calidad del agua sumamente estable, como la que pueden encontrarse en algunos pozos. En estas circunstancias, es posible hacer un ajuste manual a intervalos suficientemente espaciados para que sea práctico. Hoy en día, la automatización completa de la vigilancia y el ajuste es la práctica más común, aun en los sistemas más pequeños; sin embargo, esto solo es factible cuando el proveedor/fabricante proporciona un buen apoyo técnico inmediato a los clientes. En Europa, Estados Unidos y el Canadá, se dispone de contratos de inspección y mantenimiento de rutina, así como para reemplazar y reparar los equipos. Este arreglo ha sido posible gracias a la fiabilidad y la larga duración de los dispositivos, y puede ser apropiado para comunidades pequeñas que carecen de las capacidades técnicas necesarias para mantener y reparar este tipo de equipo; sin embargo, todavía no se conoce si en América Latina se dispone de este servicio.

REFERENCIAS

- (38) Robeck, G.G., Dostal, K.A., Cohen, J.M. & Kreissl, J.F. Effectiveness of water treatment process in pesticide removal, Journal AWWA, 57: 181-200; 1965.
- (39) Richard, Y. & Brener, L. Organic materials produced upon ozonization of water, in Ozone/Chlorine Dioxide Oxidation Products of Organic Materials, R.G. Rice y J.A. Cotruvo, Editors, Intl. Ozone Inst. Cleveland, Ohio, p. 169-188; 1978.
- (40) Staehelin, J. & Hoigne, J. Decomposition of ozone in water: rate of initiation by hydrogen ion and hydrogen peroxide, Environ. Science and Technology, 16:676; 1982.
- (41) Glaze, W. H., Kang, I.W. & Chapin, D.H. The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation, Ozone Science & Engineering, 9:4; 1987.
- (42) Morris, J.C. The role of ozone in water treatment, Pages 29-36, "Proceedings of the 96th Annual Conference of the AWWA, Nueva Orleans, Vol 2., 1976.
- (43) Ozone and chlorine dioxide technology for disinfection of drinking water, Editor, Katz, J., Noyes Data Corporation, Park Ridge, Nueva Jersey, pp. 257-258; 1980.
- (44) Bader, H. y Hoigne, J. Determination of ozone in water by the indigo trisulfonate method: A submitted standard method, Ozone Science & Engineering, 4:169; 1982.

3.3 OXIDANTES MEZCLADOS

La OPS acuñó el término MOGGOD como una sigla en inglés (Mixed Oxidant Gases Generated On-site for Disinfection) para describir de manera genérica el proceso de producción de "gases oxidantes mezclados generados *in situ* para la desinfección". Esta sección se limita a tratar aquellos métodos en los cuales la electrólisis de una solución de cloruro de sodio produce una mezcla de especies de oxígeno y de cloro que actúan sinérgicamente como un potente oxidante y

conjuntamente desinfectante. Aunque también es posible producir otros tipos de oxidantes mezclados, como los interhalógenos mediante procesos electroquímicos y diversas especies de oxígeno por procesos fotolíticos, estos últimos métodos no se examinan aquí porque el uso de dispositivos MOGGOD del tipo de electrólisis ya ha tenido éxito significativo en comunidades y pueblos pequeños de América Latina, mientras que de los otros, hay experiencia muy limitada en su uso en los sistemas de abastecimiento de agua comunitarios. Recientemente se han inventado dispositivos que producen una solución de oxidantes mezclados en lugar de gas. Las especies de oxidantes producidas y la eficacia como oxidantes y desinfectantes parecen ser similares a la del gas de oxidantes mezclados cuando se inyecta en el agua. Por lo tanto, el término MOGGOD se ha cambiado al de MOGOD a fin de incluir ambos tipos de desinfectantes mezclados.

Características de los oxidantes mezclados

La producción electrofítica y simultánea de más de un oxidante no es realmente nueva, pero por lo general la industria química la ha considerado indeseable, porque la meta de ésta ha sido producir un oxidante puro para fines específicos; por lo tanto, generalmente se ha tratado de suprimir la producción de oxidantes mezclados. Sin embargo, en la industria del tratamiento de agua, los oxidantes mezclados pueden convenir, ya que varios investigadores (45) han observado las propiedades superiores de desinfección de las soluciones generadas por electrólisis *in situ*, en comparación con las del hipoclorito de sodio aplicado a la misma agua.

En los diferentes dispositivos de MOGOD existe una gran variación en la relación entre el oxígeno y las especies de cloro generadas. Se cree que esto se debe a las diferencias en el diseño de las celdas electrofíticas, al material y configuración del electrodo, y a la concentración de la sal en el electrolito. La Figura 9 ilustra la proporción relativa de especies identificadas por Pendergrass et al. (46) para un dispositivo desarrollado por "Los Alamos Technical Associates" (LATA). La proporción varía con el voltaje, teniendo una anomalía que comienza a alrededor de 18 voltios para una concentración de electrolito de 30g/litro. La proporción indicada con respecto a la celda fabricada por Oxidizers Inc. varía del 50% al 60% de cloro y del 40% al 50% de especies de oxígeno. Se informa que el dispositivo fabricado por el Centro de Desarrollo y Aplicación de Tecnología (CEDAT), en México, produce aproximadamente el 50% de especies de oxígeno. Según las características del agua que se vaya a tratar, las experiencias de campo sugieren que puede haber ventajas en el empleo de diferentes proporciones de los componentes, pero esto todavía hay que investigarlo bajo condiciones controladas.

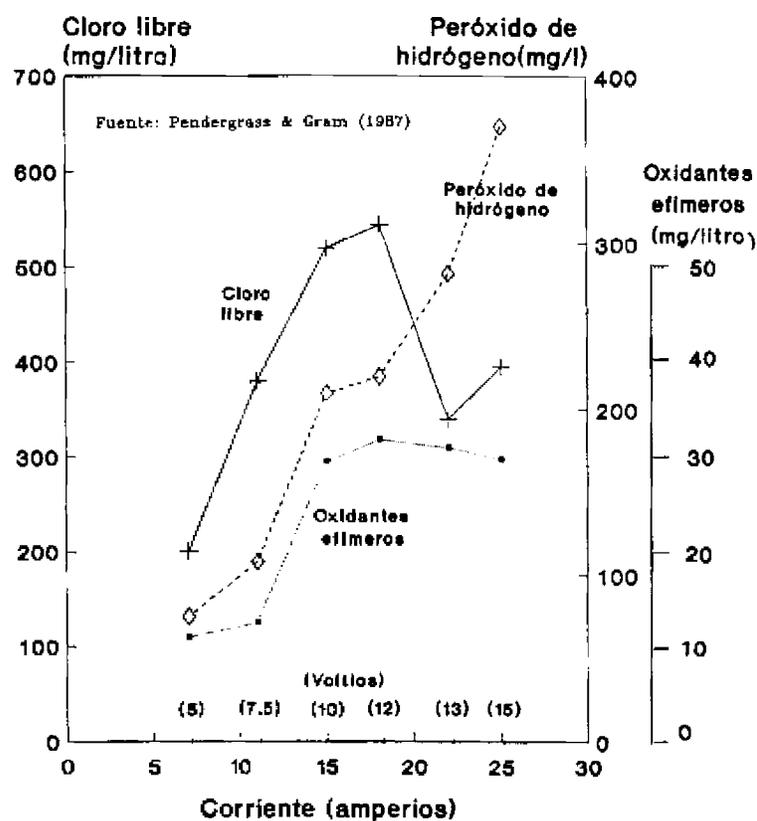


FIGURA 9
La influencia del voltaje de la corriente eléctrica en la composición de especies de oxidantes

Se ha demostrado que las especies de oxígeno de MOGOD incluyen peróxido de hidrógeno, ozono y oxidantes efímeros no identificados con precisión. Las especies de cloro incluyen el ión de hipoclorito, ácido hipocloroso y vestigios del bióxido de cloro. En la electrólisis de una solución de cloruro de sodio es de esperar la presencia de especies de cloro. La presencia de peróxido de hidrógeno se puede explicar por el hecho de que el oxígeno naciente en presencia del ión de

rógeno nascente generalmente se combinan para formar peróxido de hidrógeno). La presencia de ozono y radicales libres ha sido explicada por las reacciones catalíticas de los ánodos (48).

Debido a la interferencia de los oxidantes fuertes en las pruebas estándar y a complejidad de la reacción potencial de las diferentes especies de oxidantes, todavía no hay una determinación precisa del espectro de oxidantes producidos por los diversos dispositivos de MOGOD. Sin embargo, la mezcla de oxidantes tiene un potencial de oxidación mayor que el peróxido de hidrógeno. Desde el punto de vista práctico, estos datos no son de gran importancia, porque se ha demostrado, tanto en laboratorio como en el campo, que esta combinación de oxidantes mezclados generados *in situ* es un oxidante y desinfectante potente que, de todos modos, es más seguro y eficaz que el cloro (46). El examen comparativo de la desinfección en los sistemas de agua comunitarios con MOGOD y con cloro indica que el MOGOD produce un residual más estable en el sistema de distribución según se midió mediante las pruebas DPD y ortotolidina. No se comprende bien por qué ocurre esto, pero parece estar relacionado con el efecto sinérgico de los oxidantes múltiples que también destruyen la flora microbiana previamente establecida en las paredes de las tuberías, reduciendo la demanda

Efectos sobre la salud

Dado que la mezcla oxidante contiene algunas de las especies más fuertes de oxidantes tanto de oxígeno como de cloro (ver el Cuadro 1, sección 2), se están llevando a cabo investigaciones para determinar si con el proceso MOGOD se forman los mismos derivados indeseables que con el cloro y el ozono. Los resultados preliminares del proyecto de demostración de la OPS indican que para la misma agua tratada, el proceso MOGOD formará entre un 30% y un 80% menos trihalometanos que el cloro gaseoso (48). Duguet et al. (49) encontraron que cuando se añade peróxido de hidrógeno al agua durante la ozonación, se aumenta la tasa de transferencia de ozono y de oxidación de los compuestos orgánicos y se reduce considerablemente el número de precursores de los trihalometanos. Esto también puede ayudar a explicar la reducción del nivel de THM en el agua, después de la exposición al tratamiento MOGOD (50). En todo caso, para los sistemas de abastecimiento de agua pequeños, en lugares remotos, el riesgo de contraer enfermedades producidas por microorganismos es muchos órdenes de magnitud mayor que el riesgo de contraer cáncer debido a los derivados indeseables de la cloración (6).

No se ha encontrado que el proceso MOGOD forme clorofenoles. Con la desinfección del agua de pequeños sistemas de abastecimiento, han disminuido

sistemáticamente los problemas de sabor y olor, que el cloro empeoraba. Estudios preliminares indican que puede haber el rompimiento de enlaces dobles de compuestos alifáticos no saturados para formar aldehídos y posiblemente cetonas, pero en cantidades menores que las producidas por el ozono. No se han detectado cloratos ni cloritos en el agua tratada, ya sea en estudios de laboratorio o de campo (48).

Hasta la fecha la experiencia indica que el riesgo para la salud de los derivados indeseables del proceso MOGOD es menor que el del cloro. Todas las pruebas indican que los beneficios para la salud, de la desinfección con el proceso MOGOD, sobrepasan con creces cualquier riesgo que pudiera acarrear (48).

Química

Aunque todavía no se han determinado con precisión las proporciones de las diferentes especies oxidantes generadas por los dispositivos MOGOD, cada especie es un oxidante fuerte. El radical hidroxilo, el oxígeno atómico, el radical perhidroxilo, el ozono, el peróxido de hidrógeno, el ácido hipocloroso y el cloro se encuentran entre los oxidantes que pueden producirse por diversos dispositivos MOGOD. Los primeros cuatro, que tienen muy poca duración, en total comprenden tan solo una parte pequeña pero eficaz de oxidantes, y deben considerarse juntos como "oxidantes efímeros" como lo hicieron los laboratorios de LATA porque, para los fines prácticos, no se pueden diferenciar. El peróxido de hidrógeno y el radical perhidroxilo no son desinfectantes eficaces en el agua, pero reaccionan preferentemente con muchas sustancias presentes en el agua que de otro modo reducirían la disponibilidad de los desinfectantes más eficaces.

Las reacciones químicas de múltiples oxidantes fuertes en un medio acuoso son muy complejas y probablemente pasarán todavía muchos años antes de que se comprendan cabalmente.

Eficacia

Los oxidantes mezclados han resultado ser eficaces contra un amplio espectro de microorganismos (algunos de los cuales se encuentran entre los más resistentes a la inactivación mediante desinfección química) sobre un extenso intervalo de condiciones de pH y temperatura. Las pruebas efectuadas hasta la fecha indican que la eficacia del proceso MOGOD como desinfectante de agua es igual o superior a la del cloro.

Pendergrass et al. probaron las soluciones de oxidante mezclados generadas en la celda de electrólisis de LATA, contra *Legionella pneumophila*, *Escherichia coli*, quistes de *Giardia muris*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Bacillus subtilis* (46). Estos investigadores, con una concentración inicial de 0,40 mg/litro de oxidantes fímeros y 0,44 mg/litro de cloro libre, lograron inactivar el 100% de los quistes de *Giardia muris* en agua a 3°C, después de 30 minutos de tiempo de contacto. Estos resultados son similares a los obtenidos por Hibler en su trabajo con Photozone y cloro (51).

En 1987 la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica DGCOH de México llevó a cabo un grupo de pruebas (50) empleando un dispositivo de MOGGOD producido por Oxidizers Inc. (Virginia Beach, Va., USA). El dispositivo fue probado en agua de dos pozos contaminados (ubicados en las colonias de Santa María Aztahuacán y Agrícola Oriental) que contenía microbios atípicos muy resistentes. El agua del pozo de Santa María Aztahuacán (pH de 8,0, temperatura de 21°C) fue tratada con hipoclorito de sodio a razón de 10 mg/litro de cloro y con oxidantes mezclados que fueron generados a 2 amp (equivalente de cloro = 1,3 mg/litro) así como a 10 amp (equivalente de cloro = 4,9 mg/litro). Los resultados se presentan en la Figura 10.

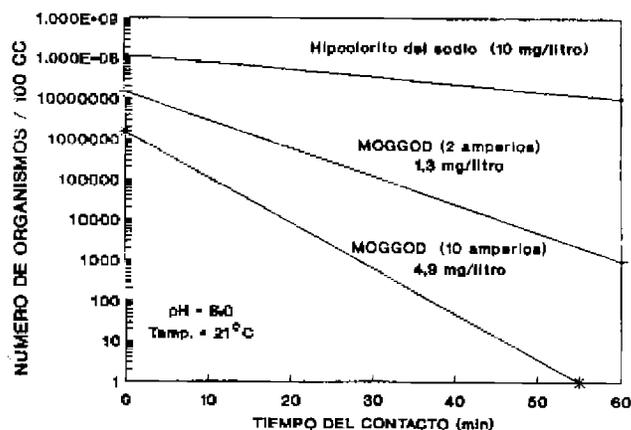
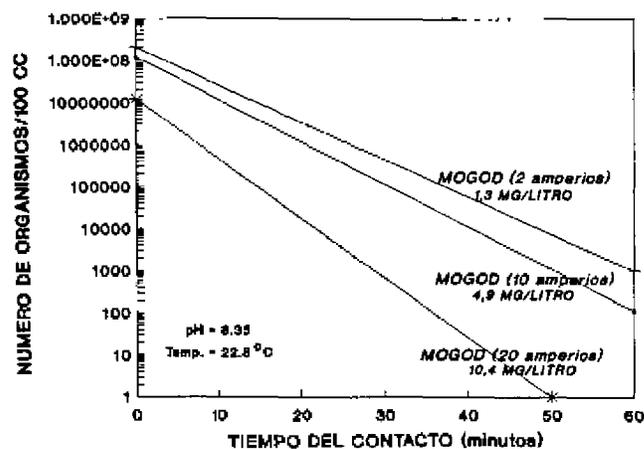


FIGURA 10
Supervivencia de bacterias atípicas en función de diferentes concentraciones y tiempos de contacto: pozo del pueblo Santa María Aztahuacán (50)

Desafortunadamente, las pruebas hechas con el pozo más contaminado de Agrícola Oriental (pH de 8.35, temperatura de 22,8°C) no incluyeron una comparación con el hipoclorito de sodio, pero sí incluyeron una dosis adicional de MOGOD (a 20 amp, equivalente a 10,4 mg/litro de cloro). Los resultados se muestran en la Figura 11



Fuente: Ramirez (1988)

FIGURA 11
Supervivencia de bacterias atípicas en función de diferentes concentraciones y tiempos de contacto: Pozo del pueblo Agrícola Oriental (50)

Olivieri y Ramirez (52) compararon la actividad bactericida y virucida del proceso MOGOD con la del cloro. Usando soluciones preparadas a partir del gas oxidante mezclado diluido con aire, y de cloro gaseoso, concluyeron que el gas producido por un MOGOD específico, inactivó *E. coli*, *P. aeruginosa* y el virus f2 con una actividad desinfectante equivalente a la de soluciones de cloro con un residual oxidante total igual medido con DPD, bajo las mismas condiciones químicas y físicas. Utilizando los datos disponibles de varias fuentes la OPS ha calculado los valores C-t para MOGOD que se resumen en el Cuadro 6.

CUADRO 6
Valores de C·t₉₉ de MOGOD para diversos microorganismos
y un pH de 6 a 7,5

Microorganismo	C·t ₉₉ (mg·min/l)
<i>Giardia lamblia</i>	
@ 3 - 5°C	6 - 10
@ 20°C	3
<i>Legionella pneumophila</i>	<3
<i>Staphylococcus aureus</i>	6
<i>Escherichia coli</i>	<2
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<3
Esporas de <i>Bacillus subtilis</i>	2000
Virus bacteriófago f ₂	<3

Análisis de capacidad oxidante

En el caso de los procesos MOGOD es necesario diferenciar entre las pruebas destinadas a la vigilancia en el campo y la investigación científica. En países sin experiencia, es preferible realizar ambas pruebas antes de adquirir grandes cantidades de equipo.

Para el análisis de MOGOD se recomienda hacer la prueba DPD (N,N-dicloro-p-fenilendiamina) que se usa para detectar cloro; esta prueba está reemplazando el método del arsenito de ortotolidina, que todavía se utiliza en algunos países latinoamericanos, a pesar de que se sospecha que el reactivo es carcinógeno. La prueba del residual de MOGOD tanto en la planta de tratamiento de agua, así como en el sistema de distribución, puede realizarse satisfactoriamente por la prueba DPD que mide los oxidantes totales presentes sin distinguir entre cloro residual libre, peróxido de hidrógeno, ozono y otros oxidantes efímeros fuertes que puedan estar presentes. Desde un punto de vista práctico, esto no es importante para determinar

la dosis inicial de desinfectante o vigilar el residual que permanece en el sistema, porque el método de DPD puede considerarse como que mide "equivalentes de cloro". El método OTA indica un residual equivalente 10% mayor que el DPD para el MOGOD. La OPS recomienda que se use DPD para las pruebas en el terreno.

Los resultados de estudios en el terreno, de más de doscientos sistemas de abastecimiento de agua pequeños en Argentina, Brasil, Colombia, Costa Rica, Cuba, Estados Unidos, Honduras, México, Perú y Venezuela indican que manteniendo un residual mínimo equivalente a 0,1 mg/litro, según se mida por cualquiera de estos dos métodos, se garantizarán sistemas exentos de bacterias coliformes. En los casos en que se investigaron, se encontró que la mayoría de los oxidantes efímeros reactivos se consumieron a los pocos minutos después de la dosificación de los gases de MOGOD en el agua, satisfaciendo en gran medida la demanda de cloro inicial (48,50). Parece que los oxidantes múltiples actúan sinérgicamente en este sentido. Se ha determinado que el residual presente en el sistema de distribución es principalmente de cloro libre, aunque hay variaciones según el contenido químico del agua; se necesita hacer más estudios para evaluar con exactitud qué oxidantes permanecen activos en una variedad de condiciones.

El análisis de laboratorio para la determinación precisa de las especies de oxidantes y sus proporciones presentes en el gas producido por los diversos dispositivos de MOGOD no ha sido totalmente satisfactorio. Las pruebas para hacer esas determinaciones en una solución acuosa han sido difíciles, debido al complejo mecanismo de la descomposición del ozono y los radicales libres, la reactividad de los oxidantes más fuertes con otras especies presentes, los múltiples trayectos de reacción potencial, los derivados de la oxidación y la interferencia mutua entre algunos de los oxidantes. La OPS recomienda que se use una serie de pruebas para estimar el espectro de especies. En esta serie de pruebas, el cloro se determina mediante la titulación de fenilarsina, H_2O_2 , por absorción ultravioleta (290nm), y oxidantes efímeros (ozono y/o radicales libres), por decolorización del colorante trisulfonato de índigo (600 nm).

REFERENCIAS

- (45) Kotula, et al. Bacterial effectiveness of three chlorine sources, Journal of American Science, Vol. 42, Nov. 6; 1976.
- (46) Pendergrass, A.M., H.F. Gram, D.K. Steele y M.K. Talley. Water disinfection with a mixed oxidant solution, presented at the First

- International Seminar on Disinfection with Mixed Oxidants Generated On-site. Dic. 5 - 12, 1987, Lima, Perú, (Patrocinado por la Organización Panamericana de la Salud).
- (47) Latimer, W.M. The oxidation states of the elements and their potentials in aqueous solutions, Second Edition, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J. p 43; 1964.
- (48) Reiff, F.M. Disinfection of drinking water with mixed oxidant gases generated on-site (MOGGOD). Boletín de la Organización Panamericana de la Salud (4); 1988.
- (49) Duguet, J.P., E. Brodard, B. Dussert y J. Mallevalle. Improvement in the effectiveness of ozonation of drinking water through the use of hydrogen peroxide. Ozone Science and Engineering, 7:3; 1985.
- (50) Ramírez, G.M. Uso de una mezcla de gases oxidantes generados "in situ" en la desinfección del agua. Boletín de investigación y desarrollo tecnológico en salud. 2:8, 6-18; 1988.
- (51) Hibler, C. Inactivation and/or destruction of the cysts of Giardia with photozone. A Report of the Dept. Of Pathology, College of Veterinary Medicine. Colorado State University, Dic. 19, 1984.
- (52) Olivieri, V.P. y M.Y. Ramírez. Comparative bactericidal and viridical activity of on-site generated oxidants used for the disinfection of water. Informe de una investigación realizada en la Universidad Johns Hopkins en 1986, presentado en el Primer Seminario Internacional sobre Desinfección con Oxidantes Mezclados Generados in-situ. Dic. 5-12, 1987, Lima, Perú, (Patrocinado por la Organización Panamericana de la Salud).

3.4 RADIACION ULTRAVIOLETA

La desinfección con radiación ultravioleta (UV) se ha venido utilizando ampliamente en los sistemas de abastecimiento de agua de establecimientos como hospitales, en industrias de alimentos y bebidas, en hoteles y buques; recientemente se ha incrementado su uso también para el tratamiento del efluente de plantas de tratamiento de aguas servidas, y ha vuelto a recibir atención como desinfectante de pequeños abastecimientos de agua, debido a su capacidad de desinfectar sin producir cambios físicos o químicos notables en el agua tratada. En proyectos de

demonstración para sistemas de abastecimiento de agua de comunidades pequeñas en Brasil, el Canadá, Estados Unidos y Europa, se ha utilizado la luz ultravioleta para la desinfección primaria, que suele ir seguida de un desinfectante químico secundario (generalmente cloraminas) para obtener un residual adecuado que asegure que no vuelvan a desarrollarse microorganismos en el sistema de distribución.

Características

La desinfección del agua con luz ultravioleta puede lograrse con longitudes de onda de luz entre 240 y 280 nanómetros (nm), obteniéndose la máxima eficiencia germicida cerca de los 260 nm. Casualmente, las lámparas de arco de mercurio a baja presión que se encuentran en el mercado producen una longitud de onda ultravioleta de cerca de 253,7 nm. La temperatura del agua tiene poca, o ninguna, influencia en la eficacia de desinfección de la luz ultravioleta, pero sí ejerce un efecto sobre el rendimiento operativo de la lámpara de luz ultravioleta. En teoría, el agua puede desinfectarse a cualquier grado por este método; sin embargo, hay varios factores que disminuyen la penetración de los rayos ultravioleta en el agua, y en el caso del tratamiento de agua esto es una consideración importante porque afecta a la eficiencia del proceso de desinfección.

La energía ultravioleta es absorbida a medida que atraviesa la pared de la lámpara, el cuarzo o teflón de la camisa y las paredes del reactor. También es absorbida por el agua, pero en mucho mayor grado por los tipos de sólidos en suspensión o disueltos, la turbiedad y el color. En el agua para consumo humano, la concentración de los sólidos en suspensión es generalmente muy inferior a 10 mg/litro, nivel al que empieza a experimentarse problemas con la absorción de la luz ultravioleta (53). El grado de color y el tipo y cantidad de carbonos orgánicos disueltos parecen ser más importantes, en cuanto a la absorción de la luz por el agua, que la turbiedad misma, pero esta última puede proteger a los microorganismos contra la exposición a la luz ultravioleta. La absorción de luz ultravioleta se puede considerar como una demanda de luz ultravioleta que se debe determinar específicamente en función de las "peores condiciones de calidad" del agua que se pueden esperar en las operaciones. La absorción de radiación se cuantifica mediante una medición espectrofotométrica de la intensidad de luz ultravioleta de una longitud de onda de 253,7 nm, antes y después de que la luz ultravioleta haya recorrido una distancia conocida del agua que se está tratando.

Efectos sobre la salud

No se conoce que haya efectos directos adversos sobre la salud de los consumidores de agua desinfectada con luz ultravioleta. En el proceso de desinfección no se le agrega ninguna sustancia al agua; no hay ningún riesgo de

formación de trihalometanos, y la luz ultravioleta no altera el sabor ni el olor del agua tratada. A la dosificación y frecuencia utilizadas para la desinfección, no se conoce que exista la formación de derivados. La sobredosis del agua con luz ultravioleta tampoco resulta en ningún efecto nocivo. No obstante, el operador del equipo de desinfección con luz ultravioleta debe usar anteojos y ropa protectores para evitar exponerse a radiación de alta energía de luz ultravioleta.

Eficacia

Para un grado determinado de inactivación de microorganismos, el tiempo requerido de exposición del agua a la luz ultravioleta es inversamente proporcional a la intensidad de la luz que penetra el agua, teniendo en cuenta la capacidad de absorción del agua y la dispersión de la luz debida a la distancia (54). En 1975 se demostró que, independientemente de la duración y la intensidad de la dosificación, si se suministra la misma energía total, se obtiene el mismo grado de desinfección (55). La energía necesaria para la destrucción o inactivación de un microorganismo específico se expresa en unidades de segundos microvatio por centímetro cuadrado ($\mu\text{v}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$).

Se cree que la inactivación con luz ultravioleta se produce mediante la absorción directa de la energía ultravioleta por el microorganismo y una reacción fotoquímica intracelular resultante que cambia la estructura de la bioquímica de las moléculas (probablemente en las nucleoproteínas) que son esenciales para la supervivencia del organismo.

Se ha determinado que la *Escherichia coli* es más resistente a la desinfección por luz ultravioleta que las especies *Salmonella* y *Shigella* (56). También se ha revelado que el *Streptococcus faecalis* es cerca de tres veces más resistente, el *Bacillus subtilis*, cuatro veces más resistente; y las esporas de *B. subtilis*, seis veces más resistentes a la desinfección por luz ultravioleta que la *E. coli* (57). Con dosis de $4\,000\ \mu\text{v}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$, se han notificado inactivaciones cuatrilogárfmicas o mayores de poliovirus, de ecovirus y del virus Coxsackie (58). La mayoría de los equipos de desinfección ultravioleta utilizan una exposición mínima (en agua clara) de $30\,000\ \mu\text{v}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$. Esto es adecuado para inactivar las bacterias y virus patógenos, pero quizás no sea suficiente para ciertos protozoos patógenos, quistes de protozoos y huevos de nematodos, que pueden requerir hasta $100\,000\ \mu\text{v}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ para su inactivación total.

Se ha demostrado que la desinfección ultravioleta sigue la ley de Chick de la cinética de la desinfección (59), según se expresa en la ecuación siguiente:

$$\text{donde: } \frac{-\log N}{N_0} = \frac{I \cdot t}{Q}$$

- N_0 = el número original de microorganismos
 N = el número de microorganismos sobrevivientes
 I = la intensidad de exposición, en microvatios por centímetro cuadrado
 t = el tiempo de exposición, en segundos y
 Q = la dosis para la supervivencia unilogarítmica, en microvatios segundo por centímetro cuadrado

La dosis necesaria para la supervivencia unilogarítmica suele designarse como un lete. Lamentablemente, hay una variación considerable en la magnitud absoluta notificada de Q , principalmente debido a la dificultad para determinar con exactitud la duración e intensidad promedio de la exposición en los contactores utilizados y otras variables que intervienen en el proceso. El Cuadro 7 muestra valores reportados por varias fuentes para algunos microorganismos. Estos dan una idea del rango y orden de magnitud de las exposiciones.

Métodos para determinar la dosificación

La única manera fiable de determinar la eficiencia biocida de la desinfección ultravioleta es haciendo un muestreo del agua tratada y pruebas microbiológicas para determinar el contenido de microorganismos indicadores. Con una celda fotoeléctrica también se puede medir la intensidad de exposición desde uno o varios puntos estratégicos dentro de la cámara de exposición, pero esto no necesariamente significa que todos los microorganismos han recibido una dosis de luz ultravioleta suficiente para asegurar su inactivación o la muerte. Este tipo de monitoreo de la intensidad de la luz ultravioleta debe ser continuo y la dosis debe ser adecuada para que garantice una exposición suficiente en todo momento en las condiciones esperadas de calidad y flujo del agua.

CUADRO 7
Dosis de energía ultravioleta (254 nm) (microvatios-segundo/cm²)
notificada necesaria para inactivar diversos organismos

Microorganismo	Energía requerida
<i>Escherichia coli</i>	360 - 2.400
<i>Staphylococcus aureus</i>	210 - 400
<i>B. paratyphi</i>	320
<i>B. subtilis</i>	1.000 - 2.440
Esporas de <i>B. subtilis</i>	2.160 - 12.000
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	2.500
<i>S. typhimurium</i>	3.200
Virus colifago T 3	160
Poliovirus	780
Huevos de nematodos	18,400
Paramecium	40,000
Quiste de <i>Giardia muris</i>	60.000 - 100.000

Otras consideraciones

Una gran ventaja de la desinfección con luz ultravioleta es que no se requieren productos químicos. Otra es que el tiempo de exposición puede ser muy corto en comparación con la duración del contacto necesario para los desinfectantes químicos convencionales. También es eficaz para una gran variedad de microorganismos. Estos tres factores son especialmente importantes en la desinfección del agua embotellada.

Una gran desventaja para la desinfección de sistemas de abastecimiento de agua es que la luz ultravioleta no proporciona residuales. Otra es una notable

reducción de la eficiencia cuando aumenta la turbiedad o el color del agua. Además, se dificulta la medición de la eficacia de una instalación específica, excepto si se hace una prueba para determinar la presencia de organismos indicadores después del tratamiento con luz ultravioleta; se puede vigilar la energía que produce la lámpara, pero no la que incide sobre los organismos que se están irradiando. (Uno de los autores ha inspeccionado un crecimiento de bacterias y de lama en la pared interior de tuberías dentro de los tres metros siguientes a la filtración con tierra de diatomas y una dosificación ultravioleta de aproximadamente 25.000 microvatios-sec/cm² en agua con una turbiedad menor de 2 UTN).

La amenaza de nueva contaminación y/o recrecimiento de bacterias en un sistema de distribución de agua son razones imperiosas para cuestionar el uso generalizado de la desinfección con luz ultravioleta sin añadir un desinfectante secundario que proporcione un residual eficaz. La eficacia dudosa de los rayos ultravioleta contra algunos de los quistes de protozoos y huevos de nematodos patógenos requiere que las aguas superficiales reciban filtración u otro tratamiento para su remoción antes de la desinfección con rayos ultravioletas. La desinfección con luz ultravioleta suele ser más costosa que los métodos convencionales de desinfección. El uso de este método de desinfección solamente, sin un desinfectante secundario, se recomendaría cuando la desinfección es preventiva; cuando el abastecimiento de agua es fiable, con turbiedad menor de 1 UTN, y cuando hay pocas probabilidades de recontaminación del sistema de distribución después del tratamiento ultravioleta. En todos los demás casos debe agregarse un desinfectante secundario.

REFERENCIAS

- (53) Venosa, A.D., H.W. Wolf y A.C. Petrsek. Ultraviolet disinfection of municipal effluents. pp 676 - 684, Water Chlorination: Environmental impact and Health Effects, Vol. 2. R. Jolley, H. Gorshov, y D.H. Hamilton, Jr., eds., Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich.; 1978.
- (54) Hoather, R. C. The penetration of ultra-violet radiation and its effects in waters. Journal Inst. Water Eng. 9:191-207, 1955.
- (55) Oliver, B.G. y E.G. Cosgrove. The disinfection of sewage treatment plant effluents using ultraviolet light. Can.J.Chem.Eng. 53:170-174, 1975.

- (56) Cortelyou, J.R., M.A. McWhinnie, M.S. Riddiford y J.E. Semrad. Effects of ultraviolet irradiation on large populations of certain water-borne bacteria in motion; the development of adequate agitation to provide an effective exposure period. Applied Microbiol. 2:227-235; 1954.
- (57) Kawabata, T., y T. Harada. J. Illumination Society 36:89; 1959.
- (58) Huff, C.B., H.F. Smith, W.D. Boring y N.A. Clarke. Study for ultraviolet disinfection of water and factors in treatment efficiency. Public Health Report 80:695-705; 1965.
- (59) Luckiesh, M. y L.L. Holladay. Disinfecting water by means of germicidal lamps. General Electr. Review. 47 (4):41-47; 1944.

3.5 YODACION

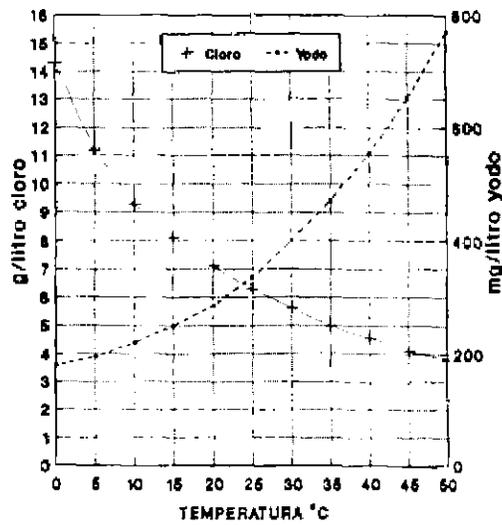
Características del yodo

El yodo es un elemento no metálico de color gris oscuro, con un peso atómico de 126,92 y es el único halógeno sólido a la temperatura y presión normales. También es el menos soluble de los halógenos. Por ser un sólido, su solubilidad aumenta a medida que sube la temperatura, mientras que la del cloro (un gas) disminuye. Según la temperatura, la solubilidad puede variar de 200 a 400 mg/litro (a 20°C es de 290 mg/litro). La Figura 12 ilustra la diferencia en solubilidad del cloro y el yodo (60). El yodo tiene el potencial más bajo de oxidación de los tres halógenos comunes: cloro, bromo y yodo (Cuadro 1), y es el que menos se hidroliza de los tres. Su baja solubilidad puede crear dificultades en la aplicación de este desinfectante en los sistemas grandes de abastecimiento de agua, pero esta propiedad podría ser una ventaja en los sistemas pequeños porque tendería a impedir una sobredosis extrema.

Efectos sobre la salud

A diferencia del cloro, la preocupación de que el yodo afecte a la salud está más relacionada con el yodo propiamente dicho y no con los productos de sus reacciones con otras sustancias que suelen encontrarse en el agua. Esto se debe principalmente a que el yodo es un oxidante débil y ni la termodinámica ni la cinética de las reacciones en un ambiente acuoso favorecen su combinación con otras sustancias; por ejemplo, las yodaminas no se forman a la dosificación requerida para

la desinfección. El yodo es un generador de trihalometanos mucho menos potente que el cloro o el bromo. Los yodoformos se producen sólo bajo condiciones que raras veces existen en sistemas de tratamiento y de distribución de agua.



Fuente: Zoeteman (1972)

FIGURA 12
Solubilidad del cloro y el yodo en función de la temperatura (60)

Pruebas para detectar los efectos en la salud de concentraciones relativamente altas de yodo en el agua potable fueron realizadas por la Oficina de Medicina y Cirugía del Departamento de la Armada de los EE.UU. (61). El propósito fue determinar si la ingesta prolongada de yodo causaba efectos tóxicos.