

Ozono frente a cloro

Desinfección y desinfectantes del agua para consumo humano



La desinfección del agua para consumo humano es uno de los procesos de potabilización que más controversia ha suscitado en los últimos tiempos, debido a los potenciales efectos indeseables que producen los diferentes aditivos y tratamientos, tanto en las cualidades organolépticas, como otros posibles efectos sobre la salud. Así, el cloro y el ozono se han convertido en los dos principales desinfectantes del agua potable, cada uno con sus ventajas e inconvenientes.

La desinfección del agua es el último paso de los que constituyen su proceso de potabilización y, qué duda cabe, el que garantiza su calidad bacteriológica para el consumo.

Hasta las últimas décadas del siglo XX, el desinfectante por excelencia ha sido el cloro y sus derivados, pero una serie de estudios y de constataciones sobre sus efectos secundarios y colaterales le ha puesto en el ojo del huracán, y las dudas sobre su idoneidad crecen según avanzan los tiempos. La caída de la «popularidad» del cloro ha ido acompañada por la subida espectacular de un compuesto cuyas bondades parecen no tener fin: el ozono.

Dentro de este entramado de compuestos oxidantes, en los que también se vislumbra una cierta guerra comercial entre la potente industria química del cloro y la de productores de instalaciones de ozono, nada es blanco ni negro y, como casi siempre, las tonalidades grises son las que se acaban imponiendo.

El cloro como agente desinfectante ha sido catalogado por muchos autores como uno de los mayores avances del siglo XX y argumentos no faltan: posiblemente sea el agente químico aplicado al beneficio de la salud humana que más millones de vidas ha salvado durante la pasada centuria. El reverso de la moneda fue la aparición y desarrollo de nuevas técnicas analíticas, a partir de la década de los setenta, que reveló la presencia de compuestos orgánicos en el agua, hasta entonces no identificados, y su fácil reacción con el cloro, formando unos subproductos, los trihalometanos, que fueron catalogados como potencialmente peligrosos para la salud. Este hecho obligó a los responsables de los suministros de agua potable a buscar nuevas alternativas a la cloración y, a partir de aquí, la irrupción del ozono ha ido de menos a más. En la actualidad, se ha convertido en un duro competidor del resto de los agentes químicos oxidantes utilizados en la desinfección del agua de abastecimiento.

No obstante, conviene hacer mención al resto de agentes que han estado y posiblemente estarán en uso en las diferentes líneas de tratamiento de las estaciones potabilizadoras, considerando, además, que es muy frecuente la combinación de más de un agente oxidante en las citadas instalaciones.

Métodos de desinfección

La desinfección, desde un punto de vista sanitario, no es otra cosa que la adecuación bacteriológica del agua a unos estándares previamente establecidos. Esto implica fundamentalmente la eliminación de microorganismos patógenos y otras formas de vida potencialmente peligrosas para la salud humana como esporas, quistes o parásitos. Gran parte de esta parafernalia microscópica es destruida, eliminada o retenida en los distintos procesos fisicoquímicos de una planta de tratamiento convencional: coagulación/floculación, sedimentación y filtración. No obstante es necesaria una desinfección para garantizar unas condiciones sanitarias óptimas en el grifo del consumidor (tabla 1).

La desinfección del agua para consumo humano puede ser de tipo químico o no químico (tabla 2). Las primeras aprovechan fundamentalmente la capacidad oxidante de los compuestos químicos para desarrollar su eficiencia desinfectante y son de uso mucho más corriente; las segundas utilizan la aplicación directa de energía, térmica o de radiaciones.

Dentro de la desinfección por métodos químicos, los compuestos más comúnmente empleados son el cloro, hipoclorito sódico, dióxido de cloro, permanganato potásico y ozono. Otros productos como las cloraminas, yodo, bromo o peróxido de hidrógeno son de uso muy limitado o excepcional.

El principal método no químico de desinfección es la radiación ultravioleta por luz artificial, pero su uso a gran escala en instalaciones de tratamiento de agua potable es muy restringido, debido a su elevado coste y su específica aplicación.

A la vista de los diferentes métodos, la práctica totalidad de los abastecimientos españoles utilizan los agentes químicos para la desinfección del agua. No obstante, su uso no suele ser unitario, sino que es muy frecuente el uso combinado de dos o hasta tres compuestos en una misma planta potabilizadora en distintos puntos del proceso, con lo que se pretende minimizar los efectos secundarios de los diferentes oxidantes y potenciar, a la vez, sus cualidades.

Sistema arcaico de desinfección por hipoclorito sódico típico de las pequeñas poblaciones españolas. El sistema consta de depósito de hipoclorito y de bomba dosificadora de membrana que adiciona el reactivo directamente en el depósito de almacenamiento del agua tratada.

Tabla 1. Condiciones que debe de tener un desinfectante ideal para su utilización en una planta de tratamiento

- Elevada capacidad de eliminación de todo tipo de patógenos
- Escasa interferencia con las características del agua: temperatura, pH, presencia de otros compuestos químicos
- No formación de subproductos indeseables con potencial peligro para la salud, o de sabor y olor desagradable
- Tiempo de reacción con el agua adecuado
- Efecto residual
- Fácil obtención o fabricación
- Sencillo manejo y baja peligrosidad en la manipulación
- Margen de seguridad adecuado en la dosificación
- Bajo coste

Tabla 2. Tipos de desinfección y de desinfectantes

DESINFECCIÓN FÍSICA
<ul style="list-style-type: none"> • Calor (no aplicable en instalaciones) • Radiación ultravioleta
DESINFECCIÓN QUÍMICA
<ul style="list-style-type: none"> • Cloro gas • Hipoclorito sódico • Dióxido de cloro • Cloraminas • Ozono • Peróxido de hidrógeno • Otros: yodo, bromo, plata ionizada



La desinfección del agua y su problema

Es preciso aclarar que la desinfección del agua nada tiene que ver con su esterilización: un agua desinfectada puede, y de hecho suele, contener un número considerable de microorganismos que son causantes en multitud de ocasiones del recrecimiento bacteriano en las redes de distribución. La desinfección implica «únicamente» la eliminación del agua potable de organismos patógenos y con esta denominación se involucra a bacterias, virus, quistes y esporas que estén contempladas en la legislación vigente. Este último concepto es de capital importancia, pues algún microorganismo que no necesariamente tenía que ser eliminado en la anterior normativa puede ser de obligada eliminación en la presente y, por ello, las características exigidas a los desinfectantes pueden cambiar de manera notable.

Una vez aclarado este punto, es preciso señalar que el desinfectante perfecto no existe. Los gestores de los abastecimientos públicos deben de realizar una labor de experimentación y estudio, siempre y cuando el presupuesto lo permita, sobre la idoneidad de un compuesto o una combinación de ellos para el agua a tratar. Habitualmente la solución siempre viene dada por la aplicación de varios productos en distintas fases del tratamiento.

Como norma general, para optimizar la eficacia de la desinfección hay que tener en cuenta dos factores: las características intrínsecas del agua y las propiedades específicas de los desinfectantes.

Características intrínsecas del agua

La eficiencia de la desinfección de una determinada agua se ve afectada, en primer lugar, por las variables fisicoquímicas de pH y temperatura: por regla general, a mayor temperatura mayor es el poder germicida de los desinfectantes. En cuanto al pH, aunque a valores extremos son destruidos la mayor parte de los microorganismos, cada desinfectante tiene un rango de pH en el que presentan una efectividad óptima. Así, por ejemplo, a una misma temperatura y un mismo tiempo de contacto, la dosis de cloro necesaria para destruir el

100% de *Escherichia coli* debe ser 8 veces superior a pH 9,5 que a pH 7.

Otro factor fundamental que influye en los resultados de la desinfección es el tipo de microorganismos que contiene el agua, pues la sensibilidad de cada especie a los distintos biocidas es notoria. Generalmente, y en las mismas condiciones, ordenados de menor a mayor resistencia, los menos resistentes son las células vegetativas de las bacterias, después los virus, esporas bacterianas y, por último, los quistes de protozoos, aunque, naturalmente, se registran grandes variaciones entre las distintas especies.

La última característica, y quizá una de las más importantes en cuanto a la efectividad de los compuestos desinfectantes, es la presencia de materia orgánica en el agua. Este hecho es doblemente significativo, puesto que, en primer lugar, la protección que ejerce la materia en suspensión a los patógenos hace ineficaz, en muchas ocasiones, la acción de cualquier agente. En segundo lugar, determinados compuestos orgánicos naturales como los húmicos y fúlvicos actúan de precursores de la formación de trihalometanos cuando se utilizan el cloro y algunos de sus derivados como desinfectantes.

Características de los desinfectantes

No es un hecho redundante que, tanto las propiedades del desinfectante como su aplicación en planta afectan de manera significativa al proceso biocida. La capacidad germicida de los desinfectantes varía enormemente de unos a otros en las mismas condiciones (tabla 3). Esta capacidad va asociada, entre otros, a la concentración aplicada de desinfectante y al tiempo de contacto de éste con el agua. Así, ocurre que pequeñas dosis de cloro con un tiempo de contacto de horas tienen la misma capacidad germicida que una dosis elevada con un tiempo de actuación de minutos. Esta constatación tiene gran importancia a la hora de evitar los recrecimientos bacterianos en las tuberías de distribución y, por tanto, la presencia de contaminación biológica de un agua en el grifo del consumidor que salió de la estación potabilizadora en perfectas condiciones.

Tabla 3. Capacidad desinfectante de los distintos agentes químicos

COMPUESTO	GENERAL	BACTERIAS	VIRUS	QUISTES
Ozono	++++	++++	+++	++
Cloro/hipoclorito	+++	++++	++	+
Dióxido cloro	+++	++++	++	+
Permanganato	++	+++	++	-

++++: muy bueno; +++: bueno; ++: regular; +: escaso; -: nulo

Cloro frente a ozono

Actualmente, tanto en el conjunto del planeta como en nuestro país, el desinfectante más ampliamente utilizado en todos los abastecimientos es el cloro y sus afines (hipoclorito sódico o dióxido de cloro). La implantación del ozono en esta última década, una vez superados los problemas de un excesivo coste y un complicado mantenimiento, ha sido importante, sobre todo en instalaciones de tamaño entre medio y grande. No obstante, todo el cloro y sus derivados están presentes incluso en las plantas de tratamiento que cuentan con ozonización, y es que el cloro sigue siendo necesario a la hora de garantizar un efecto desinfectante residual en la red de distribución.

Cloro y derivados

Dentro de la familia del cloro, los dos compuestos más utilizados son el cloro gas, en grandes instalaciones y el hipoclorito sódico, en instalaciones medias y pequeños abastecimientos. Más raramente se utiliza dióxido de cloro que, pese a ser un excelente desinfectante y no formar trihalometanos, su difícil manejo, sus elevados costes de instalación y el peligro de aparición de cloritos y cloratos, le hacen poco competitivo y con una introducción en nuestro país muy pequeña. En peor posición se encuentran las cloraminas, cuya utilización es casi testimonial debido a su baja capacidad biocida y su toxicidad intrínseca.

Es por ello que el interés de los desinfectantes de base clorada, se centra en los dos primeros, cuyas particularidades tanto en sus propiedades físico-químicas como en su comportamiento en la desinfección son muy similares.

Los compuestos de cloro reaccionan con un sinfín de compuestos presentes en el agua como los aminoácidos, amoníaco, materia orgánica, hierro, manganeso y otros. De esta variedad de reacciones el resultado es una amplia gama de subproductos como son los trihalometanos (THM), los ácidos haloacéticos (AHA), clorofenoles, halocetonas y las cloraminas (tabla 4). De to-

Los compuestos de cloro reaccionan con un sinfín de compuestos presentes en el agua como los aminoácidos, amoníaco, materia orgánica, hierro, manganeso y otros.



Botellones de cloro gas de un sistema de cloración. La disposición típica es una botella en funcionamiento y otra de reserva que funciona automáticamente al agotarse la primera.

dos ellos, los de mayor incidencia sanitaria son actualmente los dos primeros.

El cloro puede ser adicionado en diferentes puntos del sistema de tratamiento, como desinfectante único o en combinación con otros oxidantes. Al objeto de evitar la formación de THM y otros subproductos indeseables, las plantas de tratamiento evitan la utilización del cloro como oxidante al principio del tratamiento, es decir, la precloración. Esta adición sólo es aconsejable en dos situaciones: la primera, cuando la materia orgánica de entrada y la turbidez del agua tienen valores muy bajos, (esto es agua de excelente calidad); la segunda, cuando con agua de mala calidad se disponen de filtros de carbón activo al final del proceso de tratamiento, que conlleva la adsorción de los THM y otros compuestos no deseables.

En caso de aguas turbias o con elevada concentración de compuestos húmicos y fúlvicos, es recomendable

Tabla 4. Comparativa de los distintos desinfectantes con algunas de sus características

COMPUESTO	FORMACIÓN DE THM*	FORMACIÓN DE OTROS SUBPRODUCTOS	ELIMINACIÓN DE FE Y MN	ELIMINACIÓN DE NH3	COSTE
Ozono	Nula	Media	Muy bueno	Malo	Alto
Cloro	Alta	Media-alta	Bueno	Muy bueno	Bajo
Dióxido de cloro	Nula	Media-alta	Bueno	Malo	Medio
Permanganato	Escasa	Nula	Muy bueno	Regular	Bajo

*Trihalometanos



Sistema de inyectores de la dosificación de cloro gas. El control de dosificación es completamente automático.



Productor de ozono de última generación de una estación potabilizadora de tamaño medio.

una oxidación con permanganato, previa a la floculación o a la entrada de filtros, y la utilización del cloro como desinfectante final.

El cloro y el hipoclorito son buenos germicidas, aceptables viricidas y algicidas, pero tienen poca capacidad para la eliminación de quistes de protozoos. Estas cualidades se ven afectadas de manera muy importante por el pH y por la turbidez del agua. En cuanto al primero, debe tenerse en cuenta que la introducción de cloro en el agua conduce a su dismutación y a la formación de ácido hipocloroso y éste, a su vez, se disocia en equilibrio con el ión hipoclorito en una reacción dependiente del pH. Pues bien, el primero es cien veces más eficiente como germicida que el ión hipoclorito. Así pues, para optimizar la eficiencia del cloro, tanto en su aplicación como cloro gas o hipoclorito se debe de buscar siempre un pH en un rango entre 6,5-7. En condiciones ligeramente alcalinas, la dosificación debe de ser mucho mayor, por lo que el margen de seguridad disminuye notablemente.

Por otro lado, la turbidez del agua tiene una importancia extraordinaria en la adición de cloro: en primer lugar, porque una turbidez elevada implica una concentración apreciable de materia orgánica u otros elementos y la consiguiente formación de subproductos como THM o AHA y, en segundo lugar, porque los patógenos enmascarados con la protección de las partículas de materia orgánica son inaccesibles a las moléculas de cloro, sea cual sea la concentración de éste,

Pese a que la aplicación industrial del ozono como desinfectante del agua de consumo es relativamente reciente, su primera aplicación experimental con idénticos fines se debe al francés De Meriteus

por lo que la calidad bacteriológica del agua será inadecuada.

Por último, el cloro tiene otras cualidades apreciables como la eliminación de hierro y manganeso al formar óxidos insolubles de fácil retención en los filtros y la eliminación de olores y sabores cuando son originados por las algas.

Ozono

Pese a que la aplicación industrial del ozono como desinfectante del agua de consumo es relativamente reciente, su primera aplicación experimental con idénticos fines se debe al francés De Meriteus. Lo utilizó en 1886, pero fueron otros dos franceses, Calmette y Roux, en 1899, los que lo utilizaron para la desinfección de grandes cantidades de agua. Desde entonces, la utilización del ozono ha sido esporádica y se ha empleado en multitud de procesos industriales, pero hasta la década de los noventa no ha sido un serio competidor del cloro como equipo de desinfección en las plantas potabilizadoras.

Una de las principales características del ozono es su poder oxidante, superior en mucho a cualquier compuesto de cloro, lo que, unido a su capacidad de penetración y poder de bloqueo de rutas metabólicas o respiratorias, le confiere unas extraordinarias virtudes como desinfectante: es el mejor. Su capacidad germicida es veinte veces superior a la del ácido hipocloroso y el tiempo de contacto necesario para ejercer su acción es de minutos, aunque naturalmente, depende de la dosis aplicada. Asimismo, es un buen viricida y, aunque como el cloro, su capacidad de destrucción de quistes de protozoos es limitada, es superior a la de aquel.

Los factores que influyen en su eficacia son similares a los que afectan al cloro, pero en distinta escala: el rango óptimo en función del pH es muy amplio (5,5-9,5). Temperaturas entre 5 °C y 35 °C no afectan significativamente a su eficiencia y la presencia de materia orgánica no supone riesgo de formación de subproductos indeseables, ya que degrada a las sustancias precursoras de los THM.

CONCLUSIÓN FINAL

Alcanzar conclusiones que inclinen la balanza hacia uno u otro desinfectante es algo complicado. Es conveniente, en todo caso, observar la práctica diaria en diferentes plantas potabilizadoras para llegar a ver y distinguir entre las ventajas e inconvenientes teóricos y los resultados en planta.

La desinfección por cloro, tanto si es cloro gas como hipoclorito, tiene ventajas operacionales en su fácil manejo y dosificación. Respecto a sus inconvenientes desde el punto de vista sanitario, la formación de trihalometanos (THM), es evitable realizando una pre-oxidación con permanganato potásico en cabecera de planta. El problema surge cuando en muchas instalaciones existentes, el cloro se dosifica en cabecera y al final del proceso, ya que multiplica las probabilidades de producir agua con un exceso de THM, ácidos haloacéticos (AHA), clorofenoles y otros subproductos indeseables.

El ozono es un excelente desinfectante y, además, mejora otros procesos de la potabilización, como la coagulación/floculación, pero sus costes operacionales son todavía elevados y su mantenimiento complejo. Tiene efecto residual escaso y, pese a que la nueva normativa del agua para consumo humano permite la ausencia de desinfectante residual en la red de distri-



Sistema combinado de ozono-cloro.

bución, ningún gestor de abastecimientos va a asumir el riesgo que ello supone, por lo que siempre se tiene que dosificar cloro al final del tratamiento. Para lograr un agua de calidad óptima es necesario su concurso, pues elimina gran parte de los olores y sabores del agua y casi no genera subproductos.

En consecuencia, la desinfección ideal es aquella que combina dos o más desinfectantes. Los más ventajosos son los siguientes: permanganato-cloro, ozono-cloro y permanganato-ozono-cloro.

El ozono, por otra parte, «lleva menos tiempo en el mercado» que el cloro y, por tanto, sus efectos secundarios no deseados están todavía por descubrir. No obstante, se le conocen ya algunos inconvenientes que es preciso reseñar: su elevado poder oxidante, que tiene como ventaja la eliminación del riesgo de formación de THM, produce un aumento del carbono orgánico disuelto biodegradable que está relacionado con el crecimiento bacteriano en las redes de distribución; por otra parte, en aguas con elevada concentración de bromuros se pueden formar bromatos y, por último, su escaso poder residual hace necesario el uso de un desinfectante como el cloro adicionado en la fase final del sistema de tratamiento.

La todavía escasa implantación del ozono se debe, sin duda, tanto a sus elevados costes de adquisición de los equipos como de su posterior mantenimiento. La reducción de los precios de los equipos, en los últimos años, no han dejado de situar a la ozonización como el sistema más caro de todos los existentes y su mantenimiento, que requiere personal especializado, es todavía el talón de Aquiles de estos sistemas. ■

Bibliografía general

- Arboleda J. Teoría y práctica de la purificación del agua. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, 2000.
- Etron Ecology. El ozono como oxidante y desinfectante. Tecnología del agua 2001;216:56-64.
- Gray NF. Calidad del agua potable. Problemas y soluciones. Zaragoza: Acribia, 1996.
- Martí JM. STENCO Water treatment/Tratamiento de aguas. Barcelona: Stenco, 2003.
- McGhee TJ. Abastecimiento de agua y alcantarillado. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, 1999.
- Monforte L, Borrás E. Agua potable: estrategias de desinfección. Química e Industria 1999;12-24.
- RD 140/2003, de 7 de febrero (BOE del 21), por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.
- Rodríguez Vidal FJ, Pérez Serrano A, Orozco C, González Delgado MN, Ibeas MV. Biodegradabilidad de la materia orgánica natural del agua y efecto del ozono. Ingeniería del Agua 2000;3:271-8.

Nota

Agradezco la colaboración prestada en la elaboración de este artículo a Pedro Manuel San José, jefe de planta de la potabilizadora de Logroño, y a Francisco Fernández, del Departamento Técnico de SOCAMEX.