


Aspectos a considerar en la cloración de aguas residuales

Aspects to consider in the chlorination of wastewater

Norman Leonel Siguí Gil¹ 

¹Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: normanlsg@gmail.com

Recibido: 27/07/2022 Aceptado: 27/12/2022

Resumen

La cloración es el proceso de aplicación de cloro o compuestos de cloro al agua con la finalidad de eliminar microorganismos patógenos. Ha sido ampliamente estudiada la reacción del cloro con compuestos presentes en el agua y como esta puede implicar la formación de subproductos tóxicos y cancerígenos. También se ha investigado cómo las características del agua afectan la cloración y con ello la eficiencia de eliminación de microorganismos en comparación con otras metodologías de desinfección como el ozono, la radiación ultravioleta y membranas de filtración. Las regulaciones ambientales de los países han obligado a poner mucha atención en la reducción de elementos patógenos en las aguas residuales que se descargan a ríos y lagos, siendo el método de desinfección más utilizado para efluentes de plantas de tratamiento de agua residual. En países desarrollados, se suelen emplear procesos de decloración con el fin de evitar los efectos secundarios de este desinfectante, pero en Guatemala y otros países en vías de desarrollo, esta alternativa no es comúnmente empleada, resultando así en una temática que no ha sido abordada en su totalidad.

Palabras claves: Agua residual, desinfección, cloración, subproductos de la cloración.

Abstract

Chlorination is the process of addition of chlorine or chlorine compounds to the water, to eliminate pathogen microorganisms. In wastewater, it has been studied the reaction of chlorine with different compounds in water, that results in the formation of toxic and cancerogenic subproducts. Also, there is research about how water characteristics affect the chlorination and its efficiency, in comparison with other technologies like ozone, ultraviolet radiation and filtration membranes. The environmental regulations of the countries have made it necessary to pay attention to the reduction of pathogenic elements in the wastewater that is discharged into rivers and lakes, with chlorination is still the most common disinfection process for effluents of wastewater treatment plants. In developed countries, it is usual to implement dichlorination technologies to avoid secondary effects of chlorine, but in Guatemala this is not commonly used, thus resulting in a problem that has not been addressed.

Key words: Wastewater, disinfection, chlorination, disinfection byproducts.



Introducción

El tratamiento de aguas residuales es un conjunto de procesos y tecnologías, fundamentales en la protección de la salud y medio ambiente, y forma parte del enfoque de economía circular, en donde el reúso y protección del agua es indispensable para garantizar la sostenibilidad y resiliencia de las ciudades.

Los usuales procesos de tratamiento de aguas residuales no reducen la presencia de microorganismos patógenos (Collivignarelli et al., 2000) a cantidades aceptables para vertido y posterior reúso como la recreación, consumo humano y algunas actividades agrícolas (Yanko, 1993).

Para lograr una reducción significativa de patógenos, se han desarrollado tanto métodos físicos, como químicos, cada uno con sus ventajas y desventajas. En Guatemala, la desinfección se realiza principalmente mediante la aplicación de cloro y sus derivados, pero esta práctica provoca reacciones químicas con otros compuestos presentes en el agua residual, resultando en posibles impactos negativos a la salud y al medio ambiente.

El presente ensayo, describe consideraciones y aspectos básicos sobre la cloración de aguas residuales, y con ello introduce a una problemática de alta relevancia.

Contenido

La desinfección de efluentes de plantas de tratamiento de agua residual es un proceso de suma importancia en la protección de la salud humana (Xu et al., 2002). Para lograr una significativa reducción de microorganismos patógenos, se han desarrollado tecnologías como el uso de membranas de filtración, aplicación de radiación ultravioleta y procesos químicos, entre los que destacan el uso del ozono y compuestos del cloro (Collivignarelli et al., 2000).

La aplicación de cloro y sus derivados, es ampliamente extendida en todo el mundo (Collivignarelli et al., 2000). Se data como primer uso del cloro para desinfectar agua residual, en la ciudad de Hamburgo, Alemania en el año de 1893 (Calvert, 1932). Sin embargo, debido a la complejidad en

almacenamiento y toxicidad del cloro gaseoso, en los años posteriores se popularizó el uso de hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio. Asimismo, se desarrollaron otras alternativas de desinfección, como el dióxido de cloro y las cloraminas (Lazarova et al., 1999).

Por otro lado, tecnologías desarrolladas como membranas de filtración u ozono, presentan alta eficiencia en remoción de microorganismos como virus, bacterias y protozoos, sin embargo, pueden representar altos costos de inversión e incluso de operación, si se comparan con procesos de cloración (Lazarova et al., 1999).

La selección de la tecnología más apropiada para la desinfección depende de factores como la calidad del agua, tipo de microorganismos que se desean eliminar, disponibilidad en el mercado local, relación entre costo y beneficio (Lazarova et al., 1999) y requerimientos de operación y mantenimiento. Finalmente, se destaca que la alternativa seleccionada se relaciona mucho al uso que tendrá el efluente o a los requerimientos del consumidor final (Chai et al., 2018).

Gran número de autores han dirigido sus investigaciones a la comparación entre diferentes procesos de desinfección tanto para agua potable como para efluentes de agua residual. Los estudios varían en cuanto a los desinfectantes que se comparan, metodologías de aplicación, uso combinado de diferentes tipos de desinfectantes y, por último, tipo y características del afluente de agua residual a desinfectar.

Otras investigaciones han sido dirigidas a evaluar el efecto que producen en el proceso de desinfección, compuestos como las cloraminas, siendo este el caso de Fayyad y Al-Sheikh (2001). En esta misma línea Narkis et al. (1995) analizaron el efecto de los sólidos suspendidos en la desinfección por dióxido de cloro, o de manera similar, el estudio de Ayyildiz et al. (2009) que analizaron el efecto de la carga orgánica también en la desinfección por dióxido de cloro, posteriormente Kim (2014) estudió de forma más amplia los efectos sobre la desinfección por cloro, para las variables potencial de hidrógeno, temperatura, amoníaco y sólidos suspendidos.

Otro grupo de estudios, se han enfocado en la microbiología como indicador de contaminación en el agua o el efecto del desinfectante sobre los organismos microbiológicos, siendo este el caso de Cohen & Shuval (1973) quienes evaluaron al grupo coliforme total, grupo coliforme fecal y estreptococos. También se han evaluado los anteriores grupos de microorganismos como indicadores de la presencia de virus en un efluente primario de agua residual después de un proceso de cloración en un estudio realizado por Berg et al. (1978). Asimismo, Harakeh (1984) investigó el efecto combinado de varios desinfectantes (cloro, dióxido de cloro, ozono y ácido paracético) contra poliovirus tipo 1, en efluentes de agua residual municipal.

La química del cloro resulta ser bastante compleja debido a su alta capacidad de oxidación y por lo tanto alta reacción con distintos compuestos presentes en el agua residual. Un excelente ensayo sobre las reacciones químicas del cloro en el agua es el de Gray (2014) que detalla aspectos como: cloro residual, dosificación del químico, eficiencia y limitaciones.

Derivado de tal facilidad de reacción, el principal inconveniente del uso del cloro y derivados (cloraminas e hipocloritos) en la desinfección del agua residual es la obtención de otros compuestos denominados subproductos de la desinfección (Krasner et al., 2005). Éstos, se obtienen por la reacción de compuestos de cloro con materia orgánica (Liu & Li, 2010), siendo los principales: trihalometanos, ácidos haloacéticos (Singer, 1994) y N-nitrosodimetilamina (Krasner et al., 2009).

La preocupación por la generación de tales subproductos de la desinfección se debe al alto riesgo de desarrollo cáncer por la presencia de estos compuestos en el agua para consumo humano (Wang et al., 2007), siendo esto un reuso probable para los efluentes de agua residual o para el cuerpo receptor. Wang et al. (2007) demuestran en su investigación, que el potencial cancerígeno de los trihalometanos depende del tipo obtenido y forma de exposición al compuesto químico.

Adicionalmente a los efectos sobre la salud humana, el cloro residual libre y cloro residual combinado, remanente en los efluentes clorados, es altamente tóxico para la vida acuática (Brungs, 1973) en el cuerpo receptor, lo cual ha sido ampliamente

estudiado por investigadores como Charles H. Watkins, Judith M. Capuzzo, John A. Zillich y Donald P. Roseboom, han abordado el tema para diferentes tipos de organismos acuáticos.

Por tales motivos de toxicidad a la vida acuática y riesgos a la salud humana por consumo o exposición al efluente clorado, en muchas plantas de tratamiento de agua residual en países desarrollados, se implementan procesos de eliminación del cloro posteriores a su aplicación y alcance de los estándares de desinfección deseados. Estos procesos se conocen como decloración, y se puede llevar a cabo por diversos métodos, siendo el más conocido, la aplicación de sulfito o dióxido de azufre. Derivado de esto y con el objetivo de determinar la eficiencia del proceso de decloración, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América –EPA-, establece un límite máximo permisible de 0.11 mg/L para cloro residual total.

No obstante, lo anterior, el proceso de decloración no remueve el cloro residual en su totalidad en el efluente final, manteniéndose aún cierto grado de toxicidad a la vida acuática, tal como han demostrado las investigaciones de D. Rein, J. S. Jensen, D. T. Burton y L. Hall. Además, es importante indicar que productos de la cloración como péptidos y proteínas, son declorados de forma muy lenta (Maccreehan et al., 1998), haciendo que este proceso sea, en cierto grado, deficiente.

Adicionalmente, la eficiencia de la desinfección por compuestos de cloro, también se ve interferida por las características físicas, químicas y biológicas del agua residual cruda y tratada. Las características más relevantes son: potencial de hidrógeno, temperatura, sólidos suspendidos totales, presencia de materia orgánica, microbiología del agua, compuestos de nitrógeno (Kim, 2014) y bromuro (den Blanken, 1985).

Igualmente, un elemento importante que complica el monitoreo y por ende la eficiencia del proceso conjunto de cloración y decloración, es la metodología empleada para medición del cloro residual del efluente. El método estandarizado de titulación amperométrica sufre interferencias por el sulfito utilizado durante la decloración (Maccreehan et al., 1998). Otros métodos de medición, como la reacción colorimétrica con ortodilina y dietil-p-fenilendiamina,

son efectivos para medir solo cloro residual libre pero también son afectados por agentes oxidantes, turbiedad y color (Brungs, 1973), parámetros que estarán presentes en mayor o menor medida, según la eficiencia de depuración preliminar de las aguas residuales.

El método de monitoreo es especialmente importante, porque el grado de desinfección alcanzado no es el mismo según el tipo de cloro residual predominante en la solución. Por un lado, el cloro residual libre se compone por una mezcla entre ácido hipocloroso (HOCl) e ion hipoclorito (OCl⁻), siendo el primer compuesto el que presenta mayor efecto desinfectante (White, 1972). La presencia y relación entre estos dos compuestos, depende principalmente del potencial de hidrógeno (Gray, 2014), existiendo una caída para el HOCl a menores valores de pH.

Por otro lado, la mezcla de cloro con amoníaco y compuestos de nitrógeno orgánico podrá resultar en la formación de N-cloraminas orgánicas o inorgánicas (Fayyad & Al-Sheikh, 2001), lo que se define como cloro residual combinado. Entre los tipos de cloraminas, especial atención recibe la monocloramina porque su presencia suele ser mayor que las dicloraminas o tricloraminas, además su efecto residual es muy estable y duradero (Donnermair & Blatchley, 2003). Cabe destacar que el poder desinfectante de las cloraminas es menor que aquel del ácido hipocloroso, y que en general la desinfección por cloraminas es menos eficiente que la obtenida por cloro residual libre (Gray, 2014).

Según lo anteriormente descrito, el grado de nitrificación y desnitrificación, es importante en la formación de ambos tipos de cloro residual y afecta la eficiencia del proceso de desinfección (den Blanken, 1985). Lo estudiado por den Blanken (1985) es un valioso aporte a tal afirmación. La investigación compara la eficiencia de la desinfección por cloro contra la desinfección por ozono, según el grado de nitrificación del afluente, y que fue clasificado de la siguiente manera: agua no nitrificada, moderadamente nitrificada, muy nitrificada y altamente nitrificada. La eficiencia es evaluada según la remoción de diferentes tipos de microorganismos, y además analiza los cambios en la calidad del agua según parámetros físicos y químicos, tales como turbiedad, pH, carbono orgánico total y compuestos nitrogenados.

Una conclusión destacable de la investigación de den Blanken (1985) es que se obtuvieron pruebas con resultados falsos positivos para cloro residual libre, principalmente en las muestras de agua no nitrificada (en donde la presencia de nitrato es menor al amoníaco).

Otro aspecto interesante de este estudio es que relaciona la eficiencia de cloración con las variables de grado de nitrificación y tiempo de contacto, concluyendo que la cloración es una excelente alternativa para efluentes bien nitrificados y periodos largos de tiempo de contacto (de Blanken, 1985).

En cuanto al tiempo de contacto que deberá tener el proceso de cloración, dependerá mucho de la calidad del agua y la dosis de desinfectante añadida. En el caso de agua potable, el tiempo varía entre 30 a 60 minutos (Rauen et al., 2012), y en agua residual se suele considerar un intervalo de tiempo similar.

Conclusiones

Los efluentes de agua residual varían en sus características a lo largo del tiempo y dependen mucho del tipo de población o ente generador. En Guatemala es usual la implementación de plantas de tratamiento con procesos exclusivamente anaerobios, sin embargo, la investigación citada en los apartados anteriores y otras relacionadas, se refieren al estudio de la cloración y aspectos relacionados, para efluentes de tratamiento con altos grados de depuración de materia orgánica y eliminación de sólidos, obtenidos por procesos de tratamiento principalmente aerobios con moderada o alta nitrificación.

Por lo tanto, es importante para países en vías de desarrollo como Guatemala, desarrollar mayor investigación en la cloración y su relación con variables como pH, concentración de materia orgánica y temperatura, en procesos anaerobios donde la nitrificación es casi nula y por ende la presencia de nitrógeno amoniacal es mayor que la de nitratos y nitritos. La investigación de Reyes (2016) se asemeja a esta idea, evaluando diversos aspectos de la cloración y su relación con un gran número de variables para dos plantas de tratamiento aerobias. Llama la atención, que una de las plantas equipada con lagunas aireadas (aireación mecánica) presenta bajos niveles de nitrificación que se asocian a una deficiente aireación pero los resultados de formación de

cloraminas o trihalometanos son muy variables respecto a la otra planta estudiada, que presenta altos niveles de nitrificación (Reyes, 2016).

Estudios específicos a la cloración en efluentes anaerobios, podrán aportar información y parámetros a utilizar en el diseño de procesos de desinfección, para dosis fijas de cloro aplicado y tiempos de contacto variables. Además, aportarían información para la selección adecuada del método de medición de cloro residual libre y combinado. Es importante demostrar en qué casos la cloración es efectiva y económicamente viable (por inversión en infraestructura, por operación y por mantenimiento), para que la alternativa de desinfección seleccionada sea con mayor certeza, la idónea en cada proyecto a ejecutar.

Referencias

- Berg, G., Dahling, D. R., Brown, G. A., & Berman, D. (1978). Validity of fecal coliforms, total coliforms, and fecal streptococci as indicators of viruses in chlorinated primary sewage effluents. *Applied and Environmental Microbiology*, 36(6), 880–884. <https://doi.org/10.1128/aem.36.6.880-884.1978>
- Brungs, W. A. (1973). Effects of residual chlorine on aquatic life. *Water Pollution Control Federation*, 45(10), 2180–2193.
- Chai, Q., Hu, A., Qian, Y., Ao, X., Liu, W., Yang, H., & Xie, Y. F. (2018). A comparison of genotoxicity change in reclaimed wastewater from different disinfection processes. *Chemosphere*, 191, 335–341. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.024>
- Calvert, C.K. (1932). Chlorination of Sewage. *Industrial and Engineering Chemistry*, 24(1), 92–94. <https://doi.org/10.1021/ie50265a027>
- Collivignarelli, C., Bertanza, G., & Pedrazzani, R. (2000). A comparison among different wastewater disinfection systems: Experimental results. *Environmental Technology*, 21(1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/09593332108618137>
- den Blanken, J. G. (1985). Comparative disinfection of treated sewage with chlorine and ozone. Effect of nitrification. *Water Research*, 19(9), 1129–1140. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(85\)90349-5](https://doi.org/10.1016/0043-1354(85)90349-5)
- Donnermair, M. M., & Blatchley, E. R. (2003). Disinfection efficacy of organic chloramines. *Water Research*, 37(7), 1557–1570. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00522-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00522-5)
- Fayyad, M. K., & Al-Sheikh, A. M. (2001). Determination of N-chloramines in As-Samra chlorinated wastewater and their effect on the disinfection process. *Water Research*, 35(5), 1304–1310. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00393-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00393-6)
- Gray, N. F. (2014). Free and Combined Chlorine. In *Microbiology of Waterborne Diseases* (pp. 571–590). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415846-7.00031-7>
- Harakeh, M. S. (1984). The combined effects of various disinfectants against poliovirus 1 in a municipal wastewater effluent. *FEMS Microbiology Letters*, 23(1), 21–26. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1984.tb01028.x>
- Kim, S.-H. (2014). Effects of Disinfectant Concentration, pH, Temperature, Ammonia, and Suspended Solids on the Chlorine Disinfection of Combined Sewer Overflow. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 36(10), 685–690. <https://doi.org/10.4491/ksee.2014.36.10.685>
- Krasner, S. W., Chinn, R., Guo, Y. C., Hwang, C. J., Pastor, S. J., Sclimenti, M. J., Westerhoff, P., Chen, B., Chowdhury, Z. K., Sinha, S., & Rittmann, B. E. (2005). Contribution of wastewater to DBP formation. American Water Works Association [AWWA](Ed.). *124th Annual Conference and Exposition: The World's Water Event, ACE 2005*.
- Krasner, S. W., Westerhoff, P., Chen, B., Rittmann, B. E., & Amy, G. (2009). Occurrence of disinfection byproducts in United States wastewater treatment plant effluents. *Environmental Science and Technology*, 43(21), 8320–8325. <https://doi.org/10.1021/es901611m>
- Lazarova, V., Savoye, P., Janex, M. L., Blatchley, E. R., & Pommepuy, M. (1999). Advanced wastewater disinfection technologies: State of the art and perspectives. *Water Science and Technology*, 40(4–5), 203–213. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00502-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00502-8)

- Liu, J. L., & Li, X. Y. (2010). Biodegradation and biotransformation of wastewater organics as precursors of disinfection byproducts in water. *Chemosphere*, 81(9), 1075–1083.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.09.041>
- MacCrehan, W. a., Jensen, J. S., & Helz, G. R. (1998). Detection of sewage organic chlorination products that are resistant to dechlorination with sulfite. *Environmental Science and Technology*, 32(22), 3640–3645.
<https://doi.org/10.1021/es9801011>
- Rauen, W. B., Angeloudis, A., & Falconer, R. A. (2012). Appraisal of chlorine contact tank modelling practices. *Water Research*, 46(18), 5834–5847.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.08.013>
- Reyes, M. (2016). *Uso del cloro en las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, desinfección y formación de subproductos*. [Tesis maestría en ciencias en gestión ambiental, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango, Instituto Politécnico Nacional].
<http://repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/23350>
- Singer, P. C. (1994). Control of Disinfection By-Products in Drinking Water. *Journal of Environmental Engineering*, 120(4), 727–744.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(1994\)120:4\(727\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1994)120:4(727))
- Wang, G. S., Deng, Y. C., & Lin, T. F. (2007). Cancer risk assessment from trihalomethanes in drinking water. *Science of the Total Environment*, 387(1–3), 86–95.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.07.029>
- White, G. C. (1972). *Handbook of chlorination*. (1er. ed.). Editorial Van Nostrand Reinhold Co.
- Xu, P., Janex, M. L., Savoye, P., Cockx, A., & Lazarova, V. (2002). Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design. *Water Research*, 36(4), 1043–1055.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00298-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00298-6)
- Yanko, W. A. (1993). Analysis of 10 years of virus monitoring data from Los Angeles County treatment plants meeting California wastewater reclamation criteria. *Water Environment Research*, 65(3), 221–226.
<https://doi.org/10.2175/wer.65.3.5>