SELECCIÓN DE LA MEJOR TÉCNICA DE DESINFECCIÓN DEL AGUA DEPURADA PARA DIFERENTES USOS MEDIANTE MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO

Gómez-López M.D.[(p)] ; García-Cascales M.S.; Angosto J.M.; Bayo J.

Abstract

The shortage of water in the Mediterranean basin is a theme which affects the socio-economic development of these zones. One of the strategies within the management policies is the proposal to utilize treated waste waters for different uses, with it being necessary to disinfect them after treatment. At present several methods of disinfection exist which present different suitability according to the final use of the water. Thus the use of multicriteria analysis techniques is proposed for the evaluation of six techniques for disinfecting waters proceeding from sewage treatment plants, using chlorine, UV light and two treatments that combine both. For this a survey has been carried out asking experts in sewage treatment about the best disinfection technique to employ depending on the final use of the water (industrial, agricultural, urban recreational and ecological), taking into account: cost, water quality, social, and environmental criteria. The experts have prioritized the importance of each of the criteria, and valued each of the alternatives for each use. It has been possible to check that all coincide in that in not all uses the same methods for disinfection are adequate nor do the criteria considered have the same importance.

Keywords: chlorine, UV light, multicriteria decision, reuse of wastewater

Resumen

La escasez de agua en la cuenca mediterránea es un tema que afecta al desarrollo socio-económico de estas zonas. Como una de las estrategias dentro de las políticas de gestión se propone la utilización de las aguas depuradas para distintos usos, siendo para ello necesaria una desinfección tras su depuración. En la actualidad existen varios métodos de desinfección los cuales presentan diferente idoneidad según el uso final del agua. Por todo ello se propone la utilización de técnicas de análisis multicriterio para la evaluación de seis técnicas de desinfección de aguas procedentes de depuradoras, utilizando cloro, luz UV y dos tratamientos combinación de éstos. Para ello se ha efectuado una encuesta preguntando a expertos en depuración sobre la mejor técnica de desinfección a utilizar en función del uso final del agua (industrial, agrícola, urbano, recreativo y ecológico), teniendo en cuenta criterios de coste, calidad del agua, sociales y ambientales. Los expertos han priorizado la importancia de cada uno de los criterios, y valorado cada una de las alternativas para cada uso. Se ha podido constatar que todos coinciden en que no en todos los usos son adecuados los mismos métodos de desinfección ni tienen la misma importancia los criterios considerados.

Palabras clave: cloración, luz UV, decisión multicriterio, reutilización de agua residual

1. Introducción

La escasez de agua en determinadas regiones áridas o semiáridas, y el incremento de la demanda para usos agrícolas, usos recreativos, medioambientales, etc., ha hecho que en los últimos años haya aumentado el déficit de recursos hídricos disponibles, lo que nos obliga a buscar nuevas fuentes alternativas, como son principalmente, el agua de mar desalada y la reutilización de agua residual depurada, procedente de depuradoras de aguas residuales urbanas o de depuradoras industriales.

En cuanto al marco normativo, aunque a nivel internacional existen dos textos de referencia, no había una legislación específica a nivel nacional que regulara la reutilización de aguas residuales depuradas. Es con la publicación del Real Decreto 1620/2007 [1], cuando se establece el régimen jurídico para la reutilización de las aguas depuradas, estableciendo una serie de criterios de calidad exigibles en función del uso final que se vaya hacer del agua. Este Real Decreto discrimina cinco usos (urbano, agrícola, industrial, recreativo y ambiental) y dentro de estos establece diferentes usos restringidos por la calidad del agua.

A la vista de esta legislación la desinfección final del agua adquiere un papel importante en la reutilización de las aguas depuradas ya que con ella se posibilita la ampliación del campo de actuación.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales se diseñan en su mayoría para eliminar los compuestos y nutrientes provenientes de la demanda biológica de oxígeno, pero después de este proceso esta agua aun contiene un elevado número de patógenos. En este sentido, la desinfección se plantea como una potente herramienta para la inactivación y destrucción de estos microorganismos con el fin de preservar la salud humana y el medio ambiente [2].

Aunque existen varios métodos de desinfección, la cloración con ha sido el sistema más empleado tradicionalmente para la desinfección de efluentes depurados, aunque los residuos de cloro y la aparición de subproductos de la desinfección han motivado el desarrollo e implementación de otras tecnologías.

Entre ellas, la radiación ultravioleta (UV) se presenta como la alternativa más generalizada, con miles de instalaciones en todo el mundo. Sin embargo, esta tecnología no carece de inconvenientes, entre ellos: la aparición de mecanismos microbianos capaces de reparar hebras de ácidos nucleicos dañadas y la necesidad de una turbidez extremadamente baja del agua a tratar, puesto que de lo contrario la desinfección resultaría ineficaz [3].

El uso de una técnica que combine ambas alternativas es también posible, salvando así los problemas que se derivan de la utilización de una sola de ellas.

En la actualidad existen numerosos trabajos de aplicación de modelos multicriterio relacionados con el agua, trabajos como los de Carrasquero [4], sobre calidad del agua; Berbel et al. [5], Gómez-Limón y Berbel [6], Arriaza et al. [7] y Pujol et al. [8], sobre demanda de agua y Simoes et al. [9] sobre el reciclado del agua en Brasil, entre otros. En la bibliografía no se encuentran referencias asociadas a la utilización de estas técnicas a la elección de la desinfección del agua de las depuradoras, aunque si se encuentran trabajos como los de Gómez et al. [10], que estudian diferentes técnicas de desinfección, pero solo desde el punto de vista de costes y calidad.

Por todo ello y conscientes del problema de la elección del mejor método de desinfección, en este trabajo se ha planteado la utilización de técnicas multicriterio para elegir el tipo de desinfección para el agua procedente de depuradora, discriminando entre los distintos usos descritos en el RD 1620/2007 [1]. Para ello se ha contado con la colaboración de expertos en depuración, tanto en el planteamiento del problema como en la contestación de la encuesta.

2. Metodología y cálculos

El análisis de decisiones es un conjunto de procedimientos para analizar problemas complejos de decisión. Estos procesos llevan consigo la división del problema general en partes más fáciles de analizar y de comprender, Luce y Raiffa [11] y Triantaphyllou [12]. En nuestro caso, se han detallado dos fases claramente diferencias en el proceso de toma de decisiones. Una primera fase de obtención de información donde se encuentran implicados diferentes agentes como expertos en depuración, y expertos en métodos de decisión multicriterio (MDMC). Y una segunda fase de tratamiento de la información por parte de los expertos en MDMC, en la que se realizaron los cálculos para la elección de la mejor alternativa, utilizando el método TOPSIS.

Los distintos enfoques en las decisiones multicriterio se diferencian en la forma en que se combinan los datos y en que las decisiones sean individuales o bien sean tomadas por un conjunto de individuos. En nuestro caso se ha optado por utilizar un proceso de decisión en grupo ya que consideramos que la pluralidad de las valoraciones así como la diversidad de los agentes implicados le confiere gran robustez al proceso de decisión.

2.1 Obtención de información

En la fase de obtención de información se han seguido los pasos que se detallan a continuación.

Paso 1: Identificación del problema. Tal y como se ha expuesto la escasez de agua en zonas como el sureste español hace que la reutilización del agua depurada sea una importante opción a considerar. Puesto que el método de desinfección a utilizar para esta agua se plantea como un problema en el que interfieren varios factores a considerar, los expertos en depuración consideraron interesante hacer un estudio multicriterio del mejor método de desinfección para cada uno de los usos definidos en el Real Decreto 1620/2007 [1], siendo estos: urbano, agrario, industrial, recreativo y ambiental.

Por tanto, se ha planteado el problema de la elección del tipo de desinfección a realizar para cada uno de los usos propuestos. Existe una clasificación dentro de cada uso en el que se detallan a su vez las calidades mínimas exigidas del agua. En cuanto a lo que se entendería como el uso aceptado dentro de cada grupo tenemos:

- Uso urbano, de tipo residencial y publico, serviría para sanitarios, riego de zonas verdes, limpieza de calles, lavado de vehículos y protección contra incendios.
- Uso agrícola, discrimina tres tipos de calidades en función del contacto del agua con la zona comestible del cultivo
- Uso industrial, establece tres grupos y destina el agua a limpieza y procesado de la industria en dos niveles y a torres de evaporación.
- Uso recreativo, en este bloque hay dos tipos, uno destina el agua a riego de campos de golf y otro a estanques y fuentes sin acceso publico.
- Uso ambiental, aquí discrimina cuatro usos, dos para recarga de acuíferos directa o indirecta, otro para riego de bosques y otro para caudales mínimos y humedales.

Pero considerando los valores límite propuestos en el RD 1620/2007 [1], y teniendo en cuenta los valores de turbidez obtenidos con la desinfección con cloración (> 4,5 UNT), se excluye en este trabajo:

- Dentro del uso definido como urbano, el uso residencial.
- El uso en torres de refrigeración y condensadores evaporativos para el uso de tipo industrial.

- Y el uso para la recarga de acuíferos por inyección directa en la utilización ambiental del agua.

Paso 2: Identificación de los criterios de evaluación. Los criterios y subcriterios seleccionados, así como su tendencia de optimización de presentan en la Tabla 1:

C1: Calidad del agua	
C11: pH	(mantener entre 6,5 y 7,5)
C12: Conductividad(µS/cm)	(a minimizar)
C13: Turbidez (unt)	(a minimizar)
C14: DBO_5 (% de reducción)	(a maximizar)
C15: Cloruros (mg/L)	(a minimizar)
C16: CT (% de reducción)	(a maximizar)
C17: CF (% de reducción)	(a maximizar)
C2: Costes	
C21: Implantación de los sistemas	(a minimizar)
C22: Explotación de los sistemas	(a minimizar)
C3: Socio-económicos	
C31: Imagen de empresa	(a maximizar)
C4: Medioambientales	
C41: Ahorro energético	(a maximizar)
C42: Residuos	(a minimizar)
C43: Emisiones	(a minimizar)

Tabla 1. Criterios de evaluación y tendencia de optimización

Paso 3: Generación de alternativas. Se ha optado por definir 4 alternativas relacionadas con los sistemas clásicos de depuración (cloración y ultravioleta), y dos alternativas mixtas de ambos sistemas. Las alternativas escogidas han sido:

- A1: UV1 → En esta primera alternativa, el agua residual depurada ha sido desinfectada con radiación ultravioleta de 260 nm de longitud de onda durante 5 minutos, equivalente a una dosis de 36,5 mJ/cm^2.
- A2: UV2 → En este caso, las muestras se trataron con radiación ultravioleta de la misma longitud de onda durante 10 minutos, equivalente a una dosis de 73,0 mJ/cm^2.
- A3: UV+CL1 → Para la tercera alternativa, se aplicó luz ultravioleta durante 5 minutos, sobre un agua previamente desinfectada con un nivel de cloro total de entre 0,35 y 0,70 ppm.
- A4: UV+CL2 → En este caso la radiación aplicada también fue de 5 min, aunque el agua había sido tratada con cloro, con un nivel total para este elemento de entre 0,71 y 0,87 ppm.
- A5: CL_4PPM → Se trata de muestras de agua residual depurada desinfectadas con hipoclorito de sodio en concentración de 4 ppm.
- A6: CL_6PPM Se trata de muestras de agua residual depurada desinfectadas con hipoclorito de sodio en concentración de 6 ppm.

Paso 4: Generación de la encuesta. La encuesta se ha definido en dos niveles, uno en el que se realizan las preguntas para obtener la importancia de los criterios por parte del experto y otro en el que se pide al experto que valore cada criterio para cada alternativa.

2.2 Tratamiento de la información

Para elegir la mejor alternativa se ha utilizado el método TOPSIS. Éste es un método para ordenar preferencias por similitud a una solución ideal. Fue desarrollado por Hwang y Yoon [13] y mejorada por los propios autores en 1987 y 1992, también trabajaron con él, entre otros, Zeleny [14] y Lai et al. [15]. El desarrollo del algoritmo de este método puede consultarse en (Gómez-López et al. [16]).

Los resultados obtenidos con el método TOPSIS se detallan a continuación. En primer lugar se muestran los pesos normalizados que los distintos expertos confieren a cada tipo de criterios, así como la decisión en grupo (Tabla 2):

	C_1	C_2	C_3	C_4
Uso urbano				
E_1	0,36	0,27	0,09	0,27
E_2	0,40	0,20	0,10	0,30
E_3	0,27	0,27	0,27	0,18
G	0,35	0,25	0,15	0,25
Uso agrícola				
E_1	0,33	0,25	0,17	0,25
E_2	0,31	0,23	0,15	0,31
E_3	0,33	0,25	0,17	0,25
G	0,32	0,24	0,16	0,27
Uso industrial				
E_1	0,25	0,33	0,17	0,25
E_2	0,29	0,29	0,21	0,21
E_3	0,25	0,33	0,17	0,25
G	0,26	0,32	0,18	0,24
Uso recreativo				
E_1	0,31	0,15	0,23	0,31
E_2	0,31	0,15	0,23	0,31
E_3	0,29	0,21	0,29	0,21
G	0,30	0,17	0,25	0,28
Uso ambiental				
E_1	0,29	0,21	0,21	0,29
E_2	0,36	0,18	0,18	0,27
E_3	0,29	0,21	0,29	0,21
G	0,31	0,20	0,23	0,26

Tabla 2. Pesos normalizados de los criterios para cada uso y para cada experto (E_1-E_3) y la agregación de grupo (G).

Como puede apreciarse existe un patrón bastante homogéneo en los pesos que los expertos han dado a cada grupo de criterios. Se puede destacar que:

- Para el uso urbano del agua los expertos 1 y 2 y el grupo dan mayor peso a los criterios de calidad y un menor peso a los criterios sociales. El experto 3 sin embargo considera que los criterios de calidad, costes y sociales tienen un peso similar y mayor que los criterios ambientales.
- Para el uso agrícola del agua los tres expertos y el grupo coinciden en darle la mayor importancia a la calidad, aunque el experto 2, la comparte con los criterios ambientales. En cuanto al menor peso se lo dan a los criterios sociales.

- En el uso industrial el mayor peso es, en todos los casos, para los criterios de costes, compartiéndolo en el caso del experto 2 con los criterios de calidad. El menor peso se lo confieren a los criterios sociales y el experto 2 también considera el mismo peso para los criterios ambientales.
- El uso recreativo del agua ya presenta mayor disparidad entre los expertos. El experto 1 y 2 le dan un mayor peso a los criterios de calidad y ambiental y el experto 3 a los criterios de calidad y sociales. El grupo prima solo los criterios de calidad. Todos coinciden en darle un menor peso a los criterios de costes que el experto 3 lo comparte con el peso de los criterios ambientales.
- En el uso ambiental es donde existe mayor discrepancia. Todos coinciden en priorizar los criterios de calidad, pero el experto 1 lo comparte con los criterios ambientales y el experto 3 con los sociales. De igual manera todos dan el menor peso a los criterios de costes, pero el experto 1 y 2 lo comparten con los criterios sociales y el experto 3 con los ambientales.

En la Figura 1 se presentan los datos de los coeficientes de proximidad y el orden de las alternativas obtenidas de la agregación en grupo, para cada uno de los usos considerados.

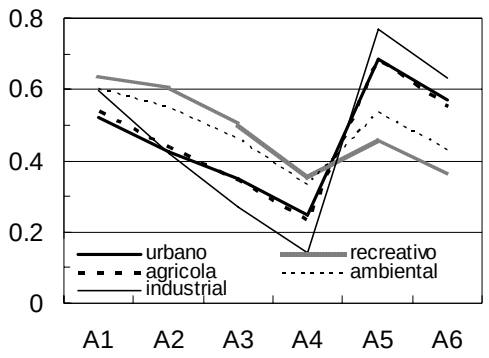

Figura 1. Resultados de la proximidad relativa, $\overline{R}_i$ (orden de preferencia), del grupo, para cada uno de los usos (urbano, agrícola, industrial, recreativo y ambiental) en la elección de la mejor técnica de desinfección del agua depurada.

En la Figura 1 se observa que en los usos urbano, agrícola e industrial el mejor método de desinfección elegido es la alternativa 5 (cloración a 4 ppm). Para el uso recreativo y ambiental se ha obtenido que la alternativa 1 (UV, 5 min) es la mejor opción de desinfección. En ambos casos las tendencias de las curvas son similares, lo que indica un patrón similar en la decisión.

En cuanto a los resultados obtenidos hay que destacar que tanta importancia han tenido en la decisión final el orden de priorizar los criterios, como el valor relativo de los pesos que se le ha dado a estos. Así, en usos como el urbano y el agrícola la elección de un sistema de cloración parece haberse debido al elevado peso que se le ha conferido a los criterios de coste y ambientales. En este sentido, aunque con el sistema UV se obtiene una buena calidad, su coste y su consumo energético es mayor que con la cloración. En el uso industrial, de igual manera, se le ha dado un mayor peso a los criterios de coste y un peso elevado a los criterios ambientales. Sin embargo para el uso recreativo y ambiental, el menor peso se le ha dado a los criterios de coste, lo que ha hecho cambiar la decisión con respecto a los otros usos. Hay que destacar que en casos en los que la rentabilidad de la actividad depende en cierta manera del precio del agua, como puede ser el caso del uso

agrícola e industrial, el precio de esta, sea un factor decisivo. Y de manera contraria, en un uso recreativo, el precio del agua de riego dentro de la gestión de un campo de golf no es un problema tan importante.

3. Conclusiones

Para la obtención de la mejor técnica de desinfección para el agua depurada con fines urbanos, agrarios, industriales, recreativos y ambientales, se ha realizado un análisis multicriterio teniendo en cuenta los aspectos de calidad del agua, costes, socio-económicos y medio ambientales. Se ha podido comprobar que cuando se priman los criterios de costes y/o ambientales (usos urbano, agrícola y industrial), el método de cloración es el elegido como la mejor opción. Y para usos en los que el coste tiene una menor importancia, y se priman en mayor medida los aspectos sociales, el método UV obtiene un mayor valor en el orden de preferencia, como es el caso del uso recreativo y ambiental.

En cuanto a la metodología multicriterio se ha podido constatar que la utilización de las herramientas de decisión en grupo, enriquece la toma de decisión ya que aúna las preferencias de diferentes agentes. En cuanto a este aspecto habría sido interesante el contar con mas variedad de expertos empresarios, usuarios y representantes de órganos de gobierno con capacidad de decisión, hecho que se plantea como líneas de trabajo futuras.

Agradecimientos

A los expertos por habernos facilitado su experiencia y su tiempo.

Referencias

[1] Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. (BOE nº 294)

[2] Huertas E., Salgot M., Hollender J., Weber S., Dott W., Khan S., Schäfer A., Messalem R., Bis B., Aharoni A. and Chikurel, H. “Key objectives for water reuse concepts”. *Desalination*, Vol. 218, 2008, pp. 120-131.

[3] United States Environmental Protection Agency. “EPA/832/F-99/064”. Office of Water, Washington, D.C. 1999.

[4] Carrasqueño N., Najul M.V. and Sánchez R. “Enfoque multicriterio para la evaluación de la calidad del agua”. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV*, Vol. 19 (3), 2004, pp. 31-41.

[5] Berbel J. and Rodriguez-Ocana A. “An MCDM approach to production analysis: An application to irrigated farms in Southern Spain”. *European Journal of Operational Research*, Vol. 107 (1), 1998, pp. 108-118.

[6] Gómez-Limón J,A. and Berbel, J. “Multicriteria analysis of derived water demand functions: A Spanish case study”. *Agricultural Systems*, 2000, Vol. 63, pp. 49-72.

[7] Arriaza M., Gómez-Limón J. A., Upton M. “Local water markets for irrigation in southern Spain: A multicriteria approach”. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 46 (1), 2002, pp. 21–43.

[8] Pujol J., Berbel J., Ramírez-de-Cartagena F., Viaggi D. and Raggi M. “Evaluation of markets for irrigation water in the internal river basins of Catalonia, Spain”. *Spanish Journal of Agricultural Research*, Vol. 4(1), 2006, pp. 3-16.

[9] Simoes C.F., Nunes K.R.A., Xavier L.H., Cardoso R. and Valle R. “Multicriteria decisión making applied to waste recicling in Brasil”. *Omega,* Vol. 36 (3), 2006, pp. 395-404.

[10] Gómez, M., Plaza, F., Garrafón, G., Pérez, J. and Gómez M.A. “A comparative study of tertiary wastewater treatment by physico-chemical-UV process and macrofiltration–ultrafiltration technologies”. *Desalination*, Vol. 202, 2006, pp. 369-376.

[11] Luce, R.D and Raiffa, H. “*Games and Decisions: Introduction and Critical Survey”.* New York: John Wiley and Sons, 1967

[12] Triantaphyllou E. (2000). *Multi-Criteria decision making methods: A comparative study. The Netherlands: Kluwer Academic*.

[13] Hwang, C.L and Yoon, K. “*Multiple Attribute Decision Methods and Applications*”. Springer, Berlin Heidelberg, 1981.

[14] Zeleny, M. *“Multiple Criteria Decision Making”. McGraw-Hill,* New York. 1982

[15] Lai, Y.J, Liu, T.Y and Hwang, C.L. “TOPSIS for MODM”. *European Journal of Operational Research*, Vol. 76 (3), 1994, pp. 486-500.

[16] Gómez-López M. D., García-Cascales M. S., Bayo J., Moreno J. M. “Utilización de técnicas de análisis multicriterio en la elección de un sistema de desinfección de agua residual”. *Proceedings of the XI Congreso internacional de ingeniería de proyectos*, Vol. 1, 2007, pp. 1112-1122.

Correspondencia (Para más información contacte con)

María Dolores Gómez López
Grupo de Gestión y Ayuda a la Toma de Decisión en Proyectos.
ETSIA. Universidad Politécnica de Cartagena.
Paseo Alfonso XIII, 52. 30204, Cartagena
Phone: +34 968 32 56 68 ;
Fax: +34 968 32 57 32 ;
e-mail: lola.gomez@upct.es