

La fiabilidad de los procesos de regeneración del agua

Rafael Mujeriego
ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Cataluña
rafael.mujeriego@upc.edu

RESUM

La evaluación de los procesos de tratamiento del agua se realiza usualmente a partir de su rendimiento medio, medido por su capacidad para obtener una determinada calidad durante un período de tiempo, aunque tiene igualmente interés determinar también su fiabilidad, medida por su capacidad para alcanzar esa calidad de forma continuada a lo largo del tiempo. Los datos experimentales obtenidos durante la vigilancia sistemática de los procesos permiten realizar ambas valoraciones. La interpretación gráfica de esos resultados mediante una escala de probabilidad normal proporciona tanto los percentiles de conformidad con un determinado límite de calidad como la variabilidad temporal (desviación típica) del parámetro en cuestión. Este artículo ilustra esta sencilla técnica de evaluación mediante varios ejemplos tomados de tres plantas de regeneración de agua de Catalunya, en los que se analiza la eficacia de la desinfección conseguida con procesos naturales (lagunajes y humedales) y con la aplicación independiente y consecutiva de luz ultravioleta y de hipoclorito sódico. Los resultados obtenidos permiten valorar los rendimientos medios de cada fase del proceso, así como las fases más críticas del proceso de desinfección. Esta técnica interpretativa es igualmente aplicable a otros parámetros de calidad del agua, como la MES o el contenido de nutrientes.

1. INTRODUCCIÓN

La evolución experimentada por el marco reglamentario, técnico, laboral, económico y social en las sociedades desarrolladas ha hecho que la fiabilidad de los servicios y de los productos comerciales constituya una de sus características prioritarias. La calidad de los efluentes de los procesos de tratamiento de agua constituye un claro ejemplo de atributo ambiental que ha de satisfacer estas exigencias.

Los niveles de calidad aplicables a los efluentes de un proceso de tratamiento de aguas suelen requerir su verificación experimental, mediante un seguimiento analítico de sus características físicas, químicas y microbiológicas. Por otra parte, el seguimiento y control de los propios procesos de tratamiento del agua también requieren la determinación de numerosos parámetros de calidad durante las fases del tratamiento. Estas actividades generan un considerable número de valores numéricos y cualitativos, que es necesario evaluar en tiempo real o con una frecuencia especificada.

Una característica importante de los procesos de tratamiento del agua es su fiabilidad o garantía, definida como su capacidad para asegurar un cierto nivel de calidad del efluente, de forma sistemática a lo largo de un periodo determinado de tiempo. Esta forma de valorar la variabilidad de la calidad del efluente tiene cada vez mayor importancia, en cuanto refleja el grado de estabilidad del propio proceso y permite anticipar los posibles efectos del efluente sobre su posible aprovechamiento, tanto si es el vertido a un medio receptor natural (suelo, agua) como si es la utilización del recurso por parte de un usuario.

Los resultados experimentales obtenidos por los programas de seguimiento y de explotación de los procesos de tratamiento de agua ofrecen una información de valor insustituible para valorar la fiabilidad o la garantía de estos procesos.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este artículo es describir los métodos comúnmente utilizados para estimar el rendimiento y la fiabilidad de los procesos de tratamiento del agua. Los objetivos específicos del artículo son: 1) analizar las posibilidades y las limitaciones interpretativas de esos métodos, 2) presentar el método gráfico basado en la distribución normal y 3) realizar una aplicación práctica de este método gráfico al caso de la inactivación microbiana conseguida durante las fases de eliminación de la MES y de desinfección con hipoclorito y luz UV, en diversas plantas de regeneración de agua.

3. SEGUIMIENTO Y MÉTODOS DE VALORACIÓN

Los objetivos del seguimiento analítico de un proceso de tratamiento de agua suelen ser múltiples: 1) determinar la conformidad con las normas de calidad del afluente y del efluente, 2) determinar el rendimiento de eliminación de determinados componentes del agua, 3) evaluar la fiabilidad del proceso de tratamiento en condiciones normales de explotación y 4) valorar los cambios de rendimiento y de fiabilidad del proceso cuando se modifican las condiciones de explotación.

El rendimiento del proceso de tratamiento suele ser uno de los objetivos prioritarios de su promotor, como forma de valorar su capacidad para eliminar una determinada fracción del contenido afluente, en condiciones medias o normalizadas de explotación. Por otra parte, el responsable de la explotación puede estar tan interesado en el rendimiento del proceso como en la fiabilidad con la que se mantienen los niveles de tratamiento. Ambas facetas del proceso son importantes, aunque cada una de ellas puede requerir una estrategia diferente de obtención de datos y de valoración de los mismos.

La estrategia comúnmente utilizada para caracterizar el funcionamiento de un proceso de tratamiento consiste en obtener una serie de medidas experimentales del parámetro que se desea evaluar, siguiendo un método lo más sistemático posible, y estimar a partir de ellas la media y la desviación típica del parámetro en cuestión. La hipótesis normalmente implícita en este método de estimación estadística es que la variable considerada se distribuye según una distribución normal. Aunque esta hipótesis suele ser aceptable en muchos de los parámetros de calidad ambiental utilizados, conviene verificar explícitamente su validez, con objeto de evitar conclusiones incorrectas. La estimación del valor medio y la desviación típica de una muestra de valores, mediante la utilización directa de un algoritmo numérico, no ofrece información suficiente para verificar la validez de la hipótesis de normalidad.

Los métodos de valoración comúnmente utilizados son: 1) la representación mediante diagrama de barras de los valores numéricos de la media y la desviación típica de la muestra de valores, 2) la descripción cronológica de la muestra de valores de la variable, 3) la valoración gráfica de la media y la desviación típica de la muestra de valores mediante su representación en un papel de probabilidad normal

(o de otro tipo de distribución en caso necesario) y 4) la valoración gráfica de la media y la desviación típica de la transformada logarítmica de la muestra de valores mediante su representación en un papel de probabilidad normal (aplicable a concentraciones microbianas por unidad de volumen).

Tanto la representación mediante diagramas de barras como la descripción cronológica son métodos comúnmente utilizados y disponibles en la gran mayoría de calculadoras y programas informáticos. La valoración gráfica mediante papel de probabilidad normal es cada vez más frecuente en los programas informáticos y de elaboración de gráficos, aunque requiere una elaboración previa de los resultados numéricos básicos. En particular, es bien conocido que la transformación logarítmica de la concentración microbiana de un agua hace que la nueva variable se distribuya según una distribución normal, hecho que se designa en los tratados estadísticos calificando la variable inicial con el nombre de variable normal-logarítmica.

Esta técnica estadística gráfica (probit) tiene una larga tradición y viene descrita en los tratados clásicos de estadística, por su gran interés en aplicaciones técnicas (Benjamin y Cornell, 1980). La Generalitat de Catalunya (1983) patrocinó la publicación de este método de estimación gráfica para la evaluación de la calidad microbiana de las aguas costeras. Estudios recientes sobre el riesgo sanitario asociado con la regeneración y reutilización de aguas han utilizado este método para caracterizar la variabilidad de la calidad del agua regenerada de diversas fuentes (Tanaka *et al.*, 1998).

4. DISTRIBUCIÓN NORMAL-LOGARÍTMICA

La concentración microbiana de un agua no es generalmente una variable normal. Sin embargo, su transformación logarítmica genera una nueva variable que se ajusta generalmente a una variable normal. La representación gráfica de esta nueva variable en un papel de probabilidad normal permite 1) verificar el grado de ajuste de la variable en cuestión a una distribución normal, mediante la interpolación de una línea recta a los puntos experimentales y 2) determinar los valores de los percentiles necesarios, y en particular de la media y la desviación típica. La transformación logarítmica puede hacerse sencillamente mediante la selección adecuada de la escala de la variable en el momento de representar los valores experimentales.

La representación gráfica en un papel de probabilidad normal, utilizando una escala logarítmica, permite obtener una serie de parámetros estadísticos de gran utilidad práctica. En primer lugar, la media de esta distribución coincide con la denominada media geométrica. Por otra parte, la conformidad con los niveles de calidad asociados a ciertos percentiles puede determinarse directamente, comprobando si la línea recta representativa de la distribución está situada por debajo (conformidad) o por encima (no conformidad) de los niveles de calidad aplicables. La desviación típica de la distribución, medida como la diferencia de los valores de la variable correspondientes a los percentiles 84 y 50 (o alternativamente los percentiles 50 y 16), ofrece una medida de la variabilidad de los valores experimentales, equivalente a su fiabilidad o garantía. Por último, la significación estadística de la diferencia entre dos de estas distribuciones puede evaluarse mediante pruebas estadísticas como la *t* de Student, para diferencias entre medias, y la X^2 para diferencias entre desviaciones típicas.

Los resultados experimentales de la calidad microbiana de un agua vienen recogidos generalmente en forma cronológica. El proceso operativo previo a la representación gráfica mediante una distribución normal requiere: 1) ordenar los valores de la variable de menor a mayor, 2) asignarle a cada uno de ellos un número de orden “i” y 3) asignarle a cada uno de los valores de la variable el valor de un estimador estadístico $F(x_i)$, entre los comúnmente aceptados:

$$F(x_i) = \frac{i}{n+1} \times 100 \qquad F(x_i) = \frac{i-0,5}{n} \times 100$$

A continuación, basta representar las parejas de valores, x_i en ordenadas frente a $F(x_i)$ en abscisas. La comprobación visual de que los puntos así obtenidos están alineados proporciona una comprobación del carácter normal de la muestra de valores utilizados. La interpolación de una línea recta sobre los puntos experimentales permite estimar la distribución normal representativa de la muestras de valores. Esta línea recta permite estimar la media, los diferentes percentiles de la distribución, la desviación típica y el grado de conformidad con los niveles de calidad asociados a determinadas frecuencias.

5. PLANTAS DE REGENERACIÓN

La planta de regeneración de agua de Castell Platja d’Aro se alimenta del efluente secundario producido en la EDAR correspondiente, y consta de un proceso de filtración en un medio granular (con adición discrecional de coagulante), seguido de una desinfección mediante luz ultravioleta (dos grupos de lámparas de media presión colocados en serie) y de una desinfección adicional mediante hipoclorito sódico. El seguimiento de la calidad microbiológica del agua se ha realizado mediante muestras tomadas en: 1) el efluente secundario, 2) el efluente de la filtración, 3) el efluente de la desinfección con luz UV y 4) el efluente de una desinfección complementaria con hipoclorito sódico.

El estudio sobre la fiabilidad de la regeneración de aguas que realiza la UPC en colaboración con la Agència Catalana de l’Aigua y el Consorci de la Costa Brava incluye también la planta de regeneración de Empuriabrava y la de Mataró.

La planta de Mataró dispone de 5 puntos básicos de muestreo, correspondientes a los efluentes de: 1) el decantador secundario, 2) el proceso de coagulación, floculación, decantación y filtración en arena, 3) la desinfección con luz UV de media presión, 4) la desinfección con hipoclorito sódico únicamente y 5) la desinfección con luz UV de media presión complementada con una adición de hipoclorito sódico.

La planta de Empuriabrava dispone de 5 puntos de muestreo, correspondientes a los efluentes de: 1) el tratamiento secundario, 2) las lagunas de decantación, 3) las lagunas de afino, 4) los humedales construidos y 5) el estanque de almacenamiento de agua. Como puede observarse, este proceso de regeneración no incluye ningún tratamiento de desinfección químico.

Los datos experimentales se han obtenido en las 3 plantas de forma sistemática durante los 5 días consecutivos (lunes a viernes) de una semana, durante 6

trimestres consecutivos de los años 2003 y 2004. La calidad microbiológica del agua se ha evaluado mediante diversos indicadores de calidad bacteriana, entre ellos los coliformes fecales, y diversos indicadores de calidad vírica, utilizando diversos bacteriófagos y virus entéricos. La valoración que se describe a continuación está referida a los resultados obtenidos para los coliformes fecales.

La Figura 1 muestra la representación gráfica convencional de la media y la desviación típica de la concentración de coliformes fecales en el efluente de las diferentes fases del proceso de regeneración. La altura relativa de las barras sombreadas muestra claramente que la adición de hipoclorito sódico mejora significativamente la desinfección del agua.

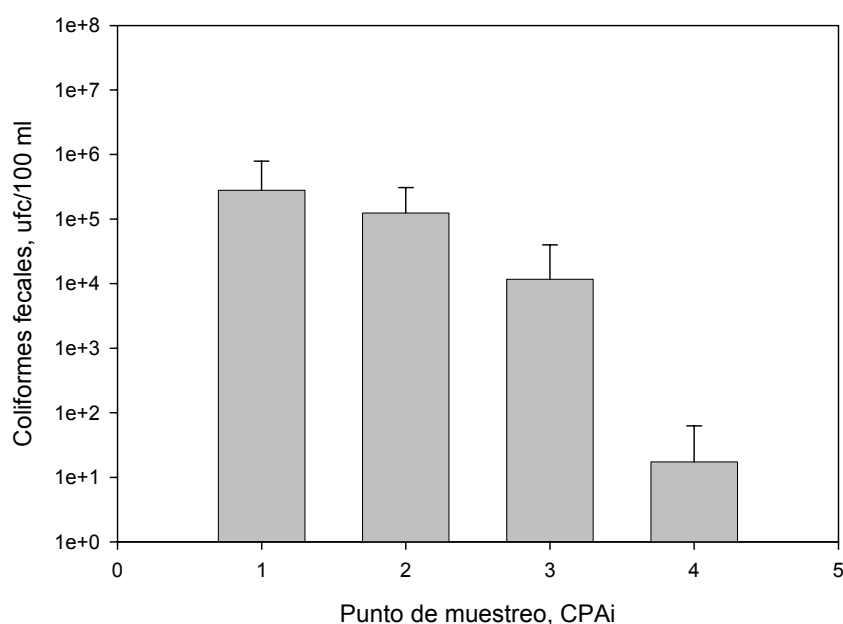


Figure 1. Diagrama de barras (media y desviación típica) del contenido de coliformes fecales del agua tratada en la planta de regeneración de Castell Platja d'Aro. 2003 y 2004.

La evolución cronológica del contenido de coliformes fecales del agua, indicada en la Figura 2, muestra la escasa relevancia relativa del proceso de filtración, a la vez que el mayor efecto desinfectante de la luz UV, aunque con una notable variación entre días. Por otra parte, la adición de una dosis prácticamente constante de hipoclorito permite asegurar la ausencia de coliformes fecales en la práctica totalidad de las muestras. Considerando que la intensidad de luz UV aplicada es prácticamente la misma, la gráfica hace pensar que la variación de ciertas propiedades del agua (como su transmitancia a la luz UV) tienen una importancia determinante en la eficacia del proceso de desinfección con luz UV. Por el contrario, la adición de una dosis constante de hipoclorito asegura una mayor fiabilidad de la calidad bacteriana del efluente.

La Figura 3 muestra las distribuciones de probabilidad normal de la calidad del agua tras las diferentes fases del tratamiento de la planta de regeneración de agua de Castell Platja d'Aro. Una primera observación es el notable ajuste de los resultados

experimentales a una línea recta, lo que evidencia el comportamiento normal de la variable en cuestión. A partir de esta verificación visual, es posible proseguir con el proceso de estimación de los parámetros estadísticos de las distribuciones.

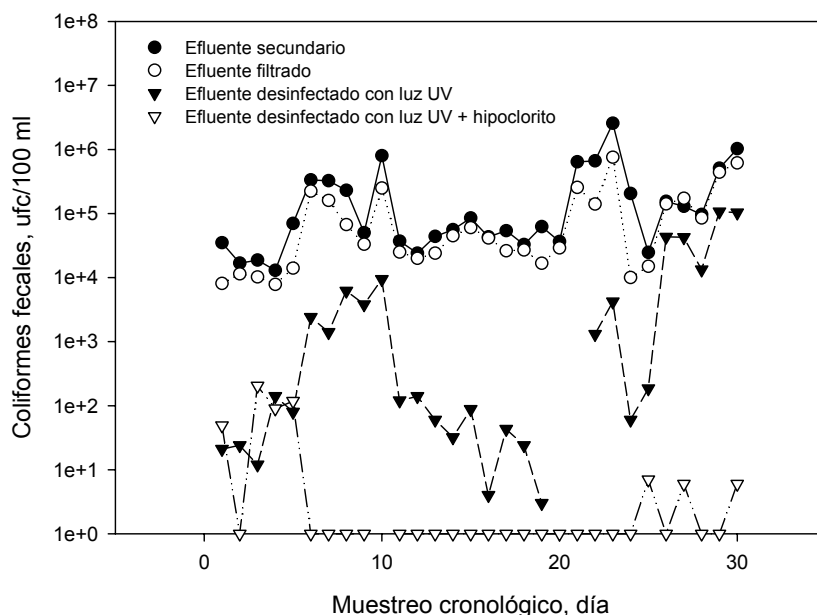


Figure 2. Evolución cronológica del contenido de coliformes fecales del agua tratada en la planta de regeneración de Castell Platja d'Aro, 2003 y 2004.

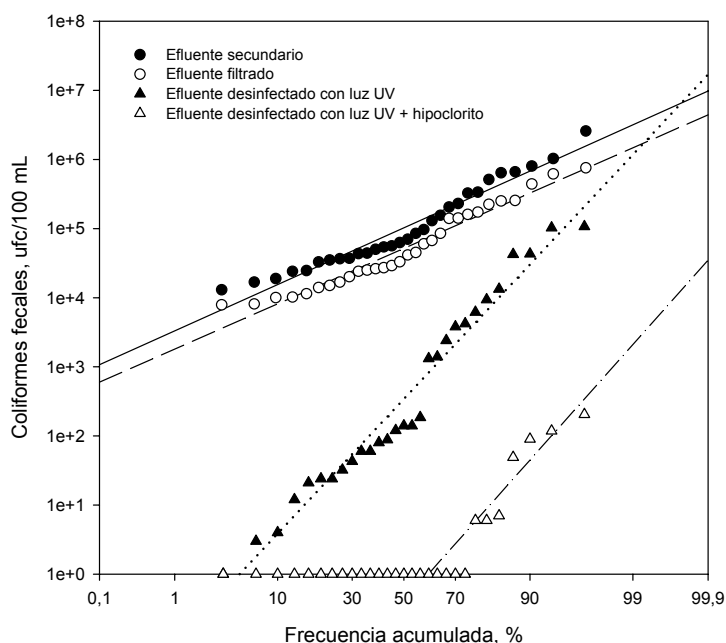


Figure 3. Distribuciones de probabilidad normal del contenido de coliformes fecales del agua tratada en la planta de regeneración de Castell Platja d'Aro, 2003 y 2004.

La pendiente tan similar de las distribuciones del efluente secundario y el efluente del proceso de filtración permite concluir que la variabilidad (fiabilidad o garantía) del contenido de coliformes fecales es muy similar en ambos casos; por otra parte, la filtración consigue una pequeña disminución del contenido microbiano, inferior a una unidad logarítmica (un factor 10). Por último, la posición relativa y la pendiente tan marcada de la calidad del agua resultante de la desinfección con luz UV pueden interpretarse diciendo que la capacidad media de este proceso para inactivar el contenido bacteriano del agua es aproximadamente de 2 unidades logarítmicas (un factor de 100), pero con una mayor variabilidad (menor fiabilidad o garantía) que los procesos previos, en cuanto que la calidad efluente es muy buena en algunos casos mientras que en otros es muy similar a la de entrada a esta fase del proceso.

La posición relativa y la pendiente tan marcada de la distribución normal del efluente del proceso complementario de desinfección puede interpretarse diciendo que la aplicación de una dosis constante de hipoclorito consigue reducir todavía más, aproximadamente otras 2 unidades logarítmicas, el contenido medio de coliformes fecales del agua tratada, pero no consigue mejorar la fiabilidad o garantía de su calidad, tal como ilustra el paralelismo entre las distribuciones de los efluentes de los dos procesos de desinfección sucesivos.

La Figura 4 muestra las distribuciones de probabilidad normal de la calidad del agua en las diferentes fases del tratamiento de la planta de Mataró. El proceso completo de tratamiento físico-químico (coagulación-floculación, decantación y filtración) consigue disminuir en 1 unidad logarítmica el contenido medio de coliformes fecales del efluente secundario, manteniendo su variabilidad, como indica la similitud de las pendientes de ambas distribuciones. La aplicación de una dosis constante de luz UV amplía el grado de desinfección del agua en un valor medio de 2 unidades logarítmicas, pero introduciendo una notable variabilidad en la calidad (escasa fiabilidad o garantía). La aplicación de una pequeña dosis adicional de hipoclorito aumenta notablemente la eficacia del proceso, a la vez que consigue recuperar la variabilidad inicial de la muestra. La adición exclusiva de una dosis constante de hipoclorito sódico permite por sí sola reducir casi totalmente el contenido de coliformes fecales del agua y asegurar una notable fiabilidad de su calidad.

La Figura 5 muestra las distribuciones de probabilidad normal de la calidad del agua en las diferentes fases del tratamiento de la planta de Empuriabrava. La gran similitud entre las pendientes correspondientes a los efluentes de los diversos procesos naturales de tratamiento indica que los procesos de desinfección natural tienen una fiabilidad similar, y que sus efectos se van acumulando hasta alcanzar un determinado valor, más allá del cual no progresa. La calidad del efluente de los humedales construidos es muy similar a la del estanque de almacenamiento, posiblemente debido a la aportación bacteriana de la fauna que habita en ellos.

En resumen, un análisis comparativo de los tres métodos utilizados para evaluar los datos experimentales indica que el análisis de barras (media y desviación típica) no muestra usualmente ni el número de datos experimentales utilizados ni una valoración de la diferencia significativa entre las diversas fases del proceso de tratamiento. Por otra parte, el análisis cronológico ofrece una valoración directa de los posibles cambios entre las diferentes fases del tratamiento. Por último, el análisis mediante el método de la distribución de probabilidad normal (probit) ofrece 1) una

visión directa del número de datos utilizados, 2) una confirmación visual aproximada de la normalidad de la muestra de datos utilizada, 3) una estimación directa de las diferencias numéricas y 4) una estimación rápida de la fiabilidad de las diferentes fases de tratamiento.

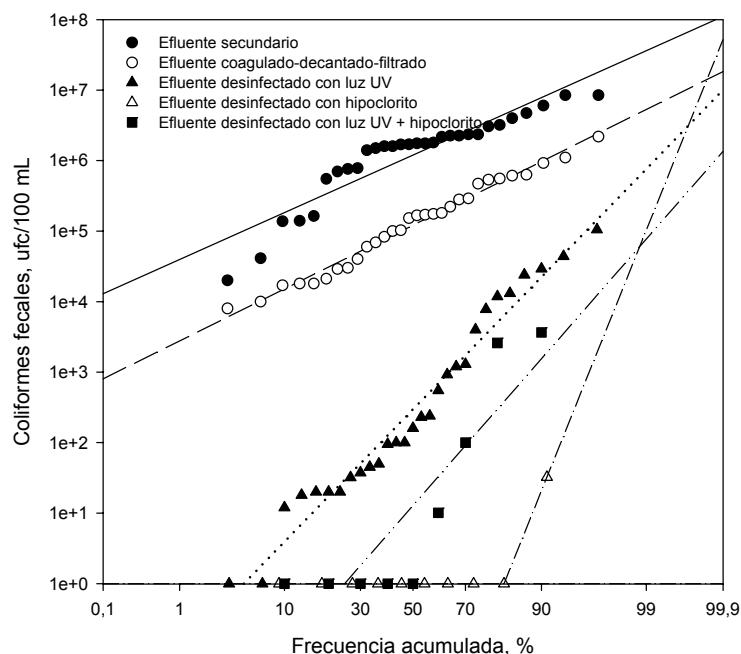


Figure 4. Distribuciones de probabilidad normal del contenido de coliformes fecales del agua tratada en la planta de regeneración de Mataró, 2003 y 2004

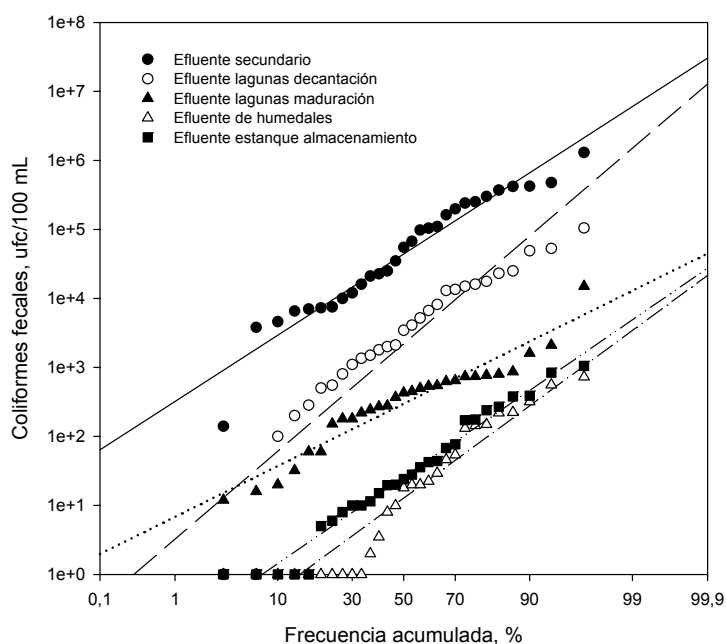


Figure 5. Distribuciones de probabilidad normal del contenido de coliformes fecales del agua tratada en la planta de regeneración de Empuriabrava, 2003 y 2004.

6. CONCLUSIONES

El grado de conformidad de la calidad de un agua con las normas de calidad aplicables constituye un elemento de creciente importancia en los programas de seguimiento de los procesos de tratamiento del agua. La fiabilidad o la garantía del proceso, medida por su capacidad para producir un efluente con una calidad estable, es uno de los aspectos más relevantes para determinar la conformidad de un efluente con las normas aplicables y asegurar tanto la protección del aprovechamiento del efluente como el control adecuado del propio proceso de tratamiento.

La aplicación gráfica del método de la distribución normal (probit) ofrece múltiples ventajas frente al método de barras (media y desviación típica) y el método cronológico, entre las que cabe destacar la comprobación directa de la normalidad de la muestra y la estimación rápida y directa tanto de las diferencias entre tratamientos como de la fiabilidad de cada uno de ellos.

La concentración de coliformes fecales del efluente secundario utilizado como materia prima en las plantas de regeneración de agua de Castell Platja d'Aro, de Empuriabrava y de Mataró muestran unos niveles y una variabilidad muy similar. Los procesos físico-químicos destinados a disminuir el contenido de MES del agua consiguen inactivar entre 0,2 y 1,0 unidades logarítmicas/100 ml (ulog/100 ml) cuando se utiliza una filtración en arena y un proceso completo de tratamiento, respectivamente.

La aplicación de una dosis constante de luz ultravioleta mediante equipos de media presión consigue inactivar entre 2,0 y 2,5 ulog/100 ml, pero con una menor fiabilidad (mayor variabilidad) que el proceso físico-químico. La variación de determinadas propiedades del agua, tales como su transmitancia a la luz UV, es sin duda responsable de esta notable disminución de la fiabilidad de este proceso de desinfección. La adición complementaria de una pequeña dosis de hipoclorito sódico permite aumentar el grado de inactivación bacteriana en 2,0 ulog/100 ml adicionales, pero no permite mejorar la fiabilidad (reducir la variabilidad) del efluente obtenido del proceso de desinfección con luz UV. La aplicación exclusiva de una dosis constante de hipoclorito sódico permite inactivar entre 3,5 y 5,0 ulog/100 ml de coliformes fecales, manteniendo una fiabilidad considerable del proceso.

Por último, una serie de cuatro procesos naturales de tratamiento de aguas, en las condiciones climatológicas propias de l'Empordà, permite conseguir una inactivación media de 3,5 ulog/100 ml, manteniendo la variabilidad inicial del afluente.

7. AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido posible en parte a una ayuda de investigación concedida por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, en el que participan la Universidad de Barcelona y la Universidad de las Islas Baleares, a una ayuda de investigación de la Fundación del Instituto Euromediterráneo de Hidrotecnia, en el que participan la Universidad de Barcelona y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, y la colaboración prestada por la Agència Catalana de l'Aigua y el Consorci de la Costa Brava. Nuestro agradecimiento a los responsables técnicos de estas instituciones así como

al personal responsable de la explotación y mantenimiento de las plantas de regeneración de agua de Castell Platja d'Aro, de Empuriabrava y de Mataró.

Nuestro agradecimiento a los técnicos de Kemira Ibérica, S.A. por su colaboración permanente en la selección de reactivos y en el suministro de los mismos en la planta de regeneración de agua de Mataró.

Este estudio refleja el trabajo y el estudio de numerosos colaboradores y alumnos de la Sección de Ingeniería Sanitaria y Ambiental que han participado en diversas fases de su ejecución y en particular a Paula Aguirre, Iván Bueso, María Planells, Eduardo Álvarez e Inmaculada Salcedo.

8. REFERENCIAS

BENJAMIN, J.R., CORNELL, C.A. (1970). *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*. McGraw-Hill Book Company.

GENERALITAT DE CATALUNYA (1983). *Informe: la qualitat de les aigües litorals*. Departament de Sanitat i Seguretat Social, Sèrie de Sanejament Ambiental.

TANAKA, H., ASANO, T., SCHROEDER, E.D., TCHOBANOGLOUS, G. (1998). Estimating the safety of wastewater reclamation and reuse using enteric virus monitoring data. *Water Environment Research*, Vol. 70, no. 1, Jan/Feb 1998, pp 39-51.

Este trabajo fue presentado en las II Jornadas Técnicas de Gestión de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales, organizadas por la Agencia Catalana del Agua, de la Generalitat de Catalunya, los días 18 a 20 de enero de 2005, en Barcelona.