

Generación de bioaerosoles en estaciones depuradoras de aguas residuales

Miguel Ángel Sánchez-Monedero¹, María Isabel Aguilar², Rocío Fenoll^{1,2} y Asunción Roig¹

Recibido: 17 de enero de 2007 - Aceptado: 26 de marzo de 2007

RESUMEN

Las operaciones que habitualmente tienen lugar en las estaciones depuradoras de aguas residuales dan lugar a la formación de bioaerosoles, o partículas aerotransportables de origen biológico, que en el caso de ser inhalados, pueden suponer un riesgo para la salud tanto para los operarios de la planta como para los habitantes de zonas residenciales vecinas. Se realizó en este trabajo un estudio en una estación depuradora de aguas residuales con el objetivo de identificar los principales focos de emisión y cuantificar los niveles de bioaerosoles generados en distintas zonas de la planta de tratamiento. Se seleccionaron 10 puntos críticos en los que se realizó un recuento total de bacterias aerotransportables utilizando un muestreador por impacto sobre una superficie de agar nutritivo, que fue usado como medio de cultivo. Los principales focos de emisión de bioaerosoles fueron localizados en el edificio de entrada de agua cruda, el reactor biológico y el edificio de deshidratación de lodos, donde se registraron concentraciones de bacterias mesófilas en el aire de 1787, 450 y 2330 unidades formadoras de colonia por metro cúbico de aire (UFC /m³), respectivamente. Estos valores son significativamente superiores a los registrados en las zonas más alejadas de las operaciones de tratamiento del agua residual (consideradas como control), donde las concentraciones no excedieron de 100 UFC/m³. La adopción de medidas para el control de las emisiones de bioaerosoles en estos puntos críticos permitiría reducir el riesgo biológico al que podrían estar expuestos los trabajadores en las estaciones depuradoras de aguas residuales.

Palabras clave: bioaerosol, estación depuradora de aguas residuales, riesgo biológico

Bioaerosol generation at wastewater treatment plants

ABSTRACT

Typical operations taking place at wastewater treatment facilities can be the source of bioaerosols that, if inhaled, could represent a biologic hazard for both site workers and local residents. A conventional wastewater treatment plant was monitored in order to identify the main bioaerosol sources and also to quantify the levels to which workers may be exposed to. Total count of mesophilic bacteria was used as monitoring parameter. Air samples were collected by using a single stage impactor from ten different locations and during different operational activities. The raw wastewater reception building, the biological reactor and the sludge dehydration unit were identified as the main bioaerosol sources, where the measured concentrations of airborne bacteria were 1786.9, 449.7 and 2329.7 UFC/m³, respectively. These levels were significantly higher than those registered in background locations, unaffected by the activities taking place in the wastewater treatment plant, usually lower than 100 CFU/m³. The implementation of mitigation measures at the main bioaerosol sources would reduce the biological hazard that wastewater treatment plant workers may be exposed to.

Keywords: bioaerosol, wastewater treatment plant, biohazard

¹ Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Murcia, España. Email: monedero@cebas.csic.es

² Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad de Murcia. España

INTRODUCCIÓN

La adecuada gestión de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales debe garantizar, además de la protección del medio ambiente, la protección de los trabajadores frente a la exposición a agentes biológicos. Para conseguir este objetivo es necesario identificar los riesgos asociados a esta exposición y sus posibles repercusiones, así se podrán establecer las medidas preventivas más adecuadas. Las aguas residuales suelen contener cantidades significativas de una gran variedad de microorganismos: virus, bacterias, hongos, protozoos y helmintos, procedentes de reservorios humanos o animales (Gerardi y Zimmerman, 2005). En general, estos microorganismos son de origen fecal y no patógenos, pueden vivir de forma natural en el agua y en el suelo, o bien pueden estar asociados a la presencia de animales que viven en este entorno o a objetos contaminados con fluidos biológicos. Las aguas residuales constituyen no sólo un vector para numerosos microorganismos, sino que además pueden ser un medio de proliferación para muchos de ellos. Sin embargo, para que la presencia de estos microorganismos pueda suponer un riesgo para el hombre, además de la propia patogenicidad del microorganismo, es necesario que el microorganismo encuentre una vía de entrada al organismo y que se desarrolle una respuesta inmunológica, que dependerá de cada individuo (Constans *et al.*, 1998).

Estos microorganismos pueden penetrar por tres vías en el organismo humano: cutánea-mucosa (por contacto directo con el foco de contaminación), digestiva (a través las manos o indirectamente de forma accidental) y respiratoria. La entrada de los microorganismos por la vía respiratoria es la más difícil de evitar, ya que se produce a través de los aerosoles, que son partículas de tamaño microscópico suspendidas en el aire de origen biológico o que pueden causar algún tipo de alergia, toxicidad o infección a los seres humanos. Numerosos autores (Rylander *et al.*, 1976; Clark, 1987; Fannin *et al.*, 1985) han detectado una enfermedad, probablemente vírica, que afecta a los trabajadores de las estaciones depuradoras de aguas residuales, por lo que ha sido llamada “el síndrome del trabajador de aguas residuales”, y está caracterizada por malestar general, debilidad, rinitis aguda y fiebre. Otros estudios han revelado una asociación significativa entre la exposición a los aerosoles generados en las estaciones depuradoras de aguas residuales y la incidencia de enfermedades respiratorias y entéricas, así como seropositividad, en trabajadores de las plantas y residentes de áreas vecinas, a varias cepas víricas contenidas en las aguas residuales (Clark, 1987; Heng *et al.*, 1994; Khuder *et al.*, 1998). También ha sido

observada la dispersión de bacterias y virus entéricos en forma de aerosoles por aspersores de irrigación con aguas residuales, y por lo tanto, la posible transmisión de agentes infecciosos (Shuval *et al.*, 1989a, 1989b).

Para determinar la posible contaminación respiratoria en las estaciones depuradoras de aguas residuales, es muy importante identificar los focos emisores y las concentraciones de los aerosoles generados en los distintos tratamientos a los que se somete el agua residual, en especial durante las operaciones de aireación o agitación del agua, que es donde mayor riesgo existe de que ocurra la transferencia de los microorganismos al aire. Este trabajo tiene dos objetivos. En primer lugar identificar los focos de emisión de aerosoles en una estación depuradora de aguas residuales convencional y, en segundo lugar, cuantificar las concentraciones de los bioaerosoles (en unidades formadoras de colonias por metro cúbico de aire) que se generan en cada una de las operaciones realizadas durante el tratamiento del agua residual.

METODOLOGÍA

Descripción de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR).

El estudio se realizó en una estación depuradora de aguas residuales localizada en el sureste de España. La planta está diseñada para dar servicio a una población equivalente de 58.500 habitantes, lo que equivale tratar un volumen de 7000 m³ de agua diarios, con un caudal medio de 290m³/hora y caudales punta de hasta 700 m³/hora. El agua residual de entrada, de origen urbano e industrial, llega a las instalaciones de pretratamiento, donde se realizan las operaciones de desbaste, tamizado y de desarenado-desengrasado. El agua pretratada llega a dos decantadores circulares (decantadores primarios), y se conduce posteriormente al tratamiento biológico. La aireación en el tratamiento biológico se realiza mediante turbinas, las cuales están provistas de faldones para evitar la formación de aerosoles. El tratamiento se completa con dos decantadores secundarios. Por último el agua se somete a un tratamiento terciario al pasar por una cámara de cloración para desinfectarla. El lodo obtenido en la línea de aguas se bombea a un digestor aerobio, donde la aireación se realiza mediante turbinas. Posteriormente el lodo se bombea a un espesador, posteriormente es deshidratado mediante unas centrífugas y finalmente se almacena para su posterior retirada. El pretratamiento y la deshidratación de lodos se realizan en edificios independientes. Para el muestreo de esta planta se han establecido nueve puntos con la ubicación descrita en la Tabla 1

Tabla 1. Localización de los puntos de muestreo en la EDAR.

Punto de muestreo	Descripción	Condiciones meteorológicas		
		T (°C)	H (%)	V (m/s)
Blanco (B)	Punto de referencia tomado en la zona de aparcamiento, en un lateral de la EDAR, no afectado por la actividad normal de la planta	25,2	30	0 – 1
Pretratamiento (PT 1)	Dentro del edificio de entrada del agua sin tratar y los sistemas de pretratamiento	20,9	46	n.a.
Pretratamiento (PT 2)	Junto al desarenador de agua urbana, en el exterior del edificio de pretratamiento	23,2	32	0 – 1
Decantador primario (DP)	En el lateral del decantador primario	24,8	28	0 – 1
Reactor biológico línea de agua (BIO 1)	Sobre la pasarela de acceso al reactor biológico de la línea de agua, situada junto a una turbina	25,4	30	0 – 1
Reactor biológico línea de lodos (BIO 2)	Sobre la pasarela de acceso al reactor biológico de la línea de lodos, situada junto a la turbina	24,1	30	0 – 1
Reactor biológico línea de lodos (BIO 3)	A 5 m. (a favor del viento) del reactor biológico de la línea de lodos (con las turbinas para la aireación en funcionamiento)	25,8	30	0 – 1
Reactor biológico línea de lodos (BIO 4)	A 5 m. (a favor del viento) del reactor biológico de la línea de lodos (con turbinas desconectadas)	25,5	26	0 – 1
Tratamiento de lodos (F)	Dentro del edificio de deshidratación de lodos, con la centrífuga en funcionamiento	26,0	31	n.a.

(T: temperatura, H: humedad relativa del aire, V: velocidad del viento, n.a.: no aplicable por estar en el interior de un recinto cerrado)

Muestreo y cuantificación de los bioaerosoles. El equipo utilizado para los muestreos es un muestreador microbiológico del aire Microflow®, basado en la captación por impacto de las partículas en suspensión directamente en el medio de cultivo. Para los muestreos se utilizó un caudal de 90 l/min y un volumen de aire de 100 l. Se realizaron tres repeticiones en cada uno de los puntos de muestreo con lo que el volumen total de aire aspirado fue de 300 l por muestra. La altura del muestreador fue de 160 cm en los puntos en los que el muestreador estaba colocado sobre el terreno, lo que corresponde a la altura media del sistema respiratorio de un operario o cualquier otro receptor. En los casos en que las muestras fueron tomadas en el interior de la planta y próximas al foco emisor, se utilizó una altura de 40 cm.

Se realizó un recuento total de bacterias mesófilas como indicador general de la contaminación microbiológica del aire para lo que se utilizó un medio de cultivo preparado en placas de contacto RODAC con agar nutritivo (14.0 g/l) y agar bacteriológico (10.0 g/l) al que se añadió

cicloheximida (100 mg/l) para inhibir el crecimiento de los hongos (Gilbert y Ward, 1999). Una vez utilizadas, las placas son incubadas a 37°C durante 48 horas para permitir el crecimiento de las colonias y su recuento visual. Únicamente se cuantificaron las colonias redondeadas de color blanco, rechazándose las que presentaron un contorno irregular. Tras la identificación y recuento del número de colonias crecidas en cada placa, se procedió a su transformación a unidades formadoras de colonia por metro cúbico de aire (UFC/m³), para lo que se tuvo en cuenta la corrección descrita por Macher (1989).

Los resultados se expresan como la media geométrica y la desviación estándar de los triplicados obtenidos en cada uno de los puntos de muestreo. A estos resultados experimentales se le aplicó el análisis de la varianza (ANOVA) mediante el software de análisis estadístico SPSS (ver 12.0). Antes de realizar el test ANOVA se procedió a la transformación logarítmica de los resultados experimentales para conseguir una distribución normal de los mismos. La separación de las medias se efectuó mediante el test de Duncan a un nivel de probabilidad $P < 0.05$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación de los focos de emisión y cuantificación de los niveles de exposición.

En la figura 1 se muestran las concentraciones medias, las desviaciones estándar y el análisis de la varianza del recuento total de mesófilos en el aire en distintos puntos de la EDAR. La concentración de bacterias mesófilas varió en el intervalo comprendido entre los 69 UFC/m³ registrados en la zona usada como control y los 2330 UFC/m³ medidos en el edificio de deshidratación de lodos, con la centrifuga en funcionamiento.

El recuento total de bacterias en la zona de aparcamiento (69 UFC/m³) fue usado como control (o blanco), puesto que esta localización estaba alejada de las operaciones que normalmente se llevan a cabo en la planta y por tanto no está afectada por las emisiones de partículas aerotransportables. De todos los puntos de muestreo estudiados, tan sólo los valores medidos junto al decantador primario (DP) y a 5 m a favor del viento del reactor biológico de la línea de lodos con los rotores desconectados (BIO 4), no presentaron diferencias significativas con respecto al blanco (B), lo que indica que la generación de bioaerosoles en estas zonas fue muy reducida al no haber movimiento o agitación del agua residual. Este hecho contrasta con Pascual *et al.* (2003) que observaron que los decantadores primarios cubiertos, y no al aire libre como en este estudio, son unos de los puntos críticos donde se genera una mayor cantidad de bioaerosoles, ya que en este punto las aguas residuales se encuentra en las primeras fases de la depuración y aun contienen una alta carga microbiana, en especial de bacterias heterótrofas.

Las concentraciones más altas fueron registradas dentro de los edificios de pretratamiento y de deshidratación de lodos donde se midieron 1770 y 2330 UFC/m³, respectivamente. Pascual *et al.* (2003) y Ranalli *et al.* (2000) también encontraron las concentraciones más altas de partículas aerotransportables durante el pretratamiento, lo que es debido, además de la mayor carga microbiana del agua residual de entrada, a las operaciones de bombeo y filtrado que favorecen la formación de bioaerosoles. El confinamiento de estas operaciones en recintos cerrados evita la dispersión de estos microorganismos a otros lugares de la planta pero, por otro lado, origina concentraciones de aerosoles ligeramente superiores respecto a otras zonas estudiadas.

Las concentraciones de bacterias mesófilas en las proximidades de los reactores biológicos tanto de la línea de agua como de la línea de lodos variaron entre 450 y 753 UFC/m³. Estos valores son ligeramente inferiores a lo que cabría esperar para este tipo de reactores, basados en una turbina que consigue la aireación del agua residual mediante una fuerte agitación del agua. La cantidad de aerosoles generados por los sistemas de aireación mecánica suele ser mayor que los generados en sistemas de aireación por difusores de aire de burbuja fina (Brandi *et al.* 2000). Pascual *et al.* (2003) y Ranalli *et al.* (2000) también encontraron una disminución de la emisión de bioaerosoles en reactores biológicos debido a la aglutinación de los microorganismos con los lodos activados durante el tratamiento biológico, que impide que sean emitidos al aire en forma de bioaerosoles.

Carducci *et al.* (2000) encontraron que las mayores concentraciones de bioaerosoles se registraban en las áreas más próximas a equipos mecánicos en movimiento o junto a los sistemas de aireación del agua residual, donde se producían concentraciones de hasta 4303 UFC/m³, mientras que las áreas que estaban próximas a los tanques de aireación no superaban los 100 UFC/m³. La baja concentración junto al reactor fue debida al tipo de aireación usada en la planta, basada en un sistema por difusores, en lugar de aireadores superficiales.

La influencia de los sistemas de aireación en la generación de bioaerosoles también fue observada en las medidas realizadas en el tratamiento biológico de la línea de lodos. Las concentraciones de bacterias mesófilas registradas en la proximidad del reactor biológico disminuyeron desde 632 UFC/m³, con las turbinas en funcionamiento, hasta valores muy similares a los del control, cinco minutos después de desconectar las turbinas de aireación (Figura 1).

Aunque no hay regulado ningún límite máximo de exposición para los bioaerosoles, las concentraciones de bioaerosoles medidas tanto en los edificios de pretratamiento, de deshidratación de lodos, o cerca de los reactores biológicos se encuentran, incluso en el caso más desfavorable, dentro del límite máximo propuesto por Sigsgaard *et al.* (1990) para el número total de bacterias (entre 5.000 UFC/m³ y 10.000 UFC/m³).

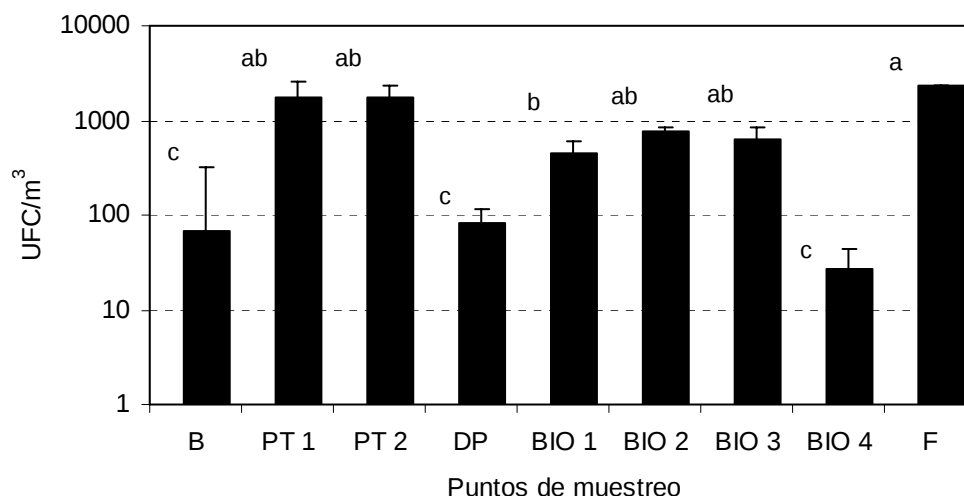


Figura 1. Recuento total de mesófilos en el aire (UFC/m³) en distintos puntos de muestreo de la EDAR. Las columnas que comparten la misma letra no presentan diferencias significativas según el test de Duncan a un nivel de probabilidad $P < 0.05$.

Influencia de las variables meteorológicas en la dispersión desde los focos emisores. En la tabla 1 se muestran las variables meteorológicas medidas en cada punto de muestreo seleccionado en la estación depuradora de aguas residuales. Estas variables son las utilizadas habitualmente para una caracterización general del punto de muestreo (Brandi *et al.*, 2000; Carducci *et al.*, 2000; Pascual *et al.*, 2003). Para el estudio exhaustivo de la relación de las variables meteorológicas con la concentración de microorganismos aerotransportables en la EDAR sería aconsejable disponer de un mayor número de muestras, sin embargo, esta relación ha sido abordada por diversos autores con resultados muy variados. Carducci *et al.* (2000) determinaron que los parámetros biológicos que se midieron en diversas EDAR's no tenían una correlación evidente con los factores meteorológicos, tales como temperatura, humedad relativa o características del viento, ni siquiera encontraron una tendencia estacional clara. Sin embargo, Pascual *et al.* (2003) determinaron que la concentración de los bioaerosoles generados en las estaciones depuradoras que estudiaron dependía de la velocidad del viento en el punto de muestreo, pero no encontraron ninguna relación de dependencia significativa entre la concentración y la humedad relativa o la temperatura. En el caso de la EDAR estudiada, la proximidad de los puntos de muestreo a los focos de emisión hace que el efecto de las variables meteorológicas no sea tan decisivo como en otras condiciones experimentales donde los puntos de muestreo están más alejados del foco emisor, donde la velocidad y dirección del viento son parámetros

decisivos en la dispersión en el aire de los microorganismos aerotransportables.

CONCLUSIONES

- Los principales focos de emisión de bioaerosoles en estaciones depuradoras de aguas residuales se localizan en las zonas donde existen mecanismos en movimiento o donde se realice la agitación o aireación forzada del agua residual (zona de pretratamiento del agua cruda, reactor biológico y edificio deshidratación de lodos).
- Las concentraciones habituales de microorganismos, en los aerosoles generados en los distintos tratamientos de las estaciones depuradoras muestreadas, variaron entre 69 UFC/m³, registrada en la zona de aparcamiento y 2330 UFC/m³, medidos en el edificio de deshidratación de lodos.
- La aplicación de medidas sencillas para evitar su emisión y su dispersión durante el manejo del agua cruda y durante el tratamiento de los lodos permitiría reducir significativamente los niveles a los que los operarios están expuestos en las estaciones depuradoras de aguas residuales, disminuyendo así su riesgo biológico.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el Programa de Becas "Marie Curie" de la Unión Europea. Los autores son los únicos responsables de la información presentada y la Comisión Europea no se responsabiliza de los resultados expuestos o las opiniones expresadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brandi G., Sisti M, y Amagliani G. (2000). Evaluation of the environmental impact of microbial aerosols generated by wastewater treatment plants utilizing different aeration systems. *J Appl Microbiol*, 88:845–52.
- Carducci A., Tozzi E., Rubulotta E., Casini B., Cantiani L., Rovini E., Muscillo M. y Pacini R. (2000). Assessing airborne biological hazard from urban wastewater treatment. *Water Research*, 34: 1173-1178.
- Clark C. S. (1987). Potential and actual biological related health risks of wastewater industry employment. *Water Pollution Control Federation Journal*, 59(12), 999-1008.
- Constans A., Alonso R.M., Martí M.C. (1998). Estaciones depuradoras de aguas residuales: riesgo biológico. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España. http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_473.htm. (Fecha de consulta: 12/01/2007)
- Fannin K. F., Vana S. C., Jakubowsky W. (1985). Effect of an activated sludge wastewater plant on ambient air densities of aerosols containing bacteria and viruses. *Applied and Environmental Microbiology*, 49, 1191-1196.
- Gerardi, M.H., Zimmerman, M.C. (2005), Wastewater Pathogens. Ed: Wiley-interscience.
- Gilbert, E.J., Ward, C.W. (1999). “Standardised protocol for the sampling and enumeration of airborne micro-organisms at composting facilities”. Ed: The Composting Association, Coventry, UK.
- Heng, B. H., Goh, K.T., Doraisingham, S., Quek, G.H. (1994). Prevalence of hepatitis A virus infection among sewage workers in Singapore. *Epidemiology and infection*. 113, 121-128.
- Khuder, S.A., Arthur, T., Bisesi, M.S., Schaub, E.A. (1998). Prevalence of infectious diseases and associated symptoms in wastewater treatment workers. *American Journal of Industrial Medicine*, 33(6), 571-577.
- Macher J.M. (1989), Positive-Hole Correction of Multiple-Jet Impactors for Collecting Viable Microorganisms. *American Industrial Hygiene Association*. 50(11):561-568.
- Pascual L., Pérez-Luz S., Yáñez M.A., Santamaría A., Gubert K., Salgot M., Apraiz D., Catalán V. (2003). Bioaerosol emission from wastewater treatment plants. *Aerobiología* 19, 261-270.
- Ranalli G., Principi P., y Sorlini C.(2000). Bacterial aerosol emission from wastewater treatment plants : Culture methods and bio-molecular tools. *Aerobiología*, 16:39-46
- Rylander R., Anderson K., Belin L., Berglund G., Bergstrom R., Manson L. A., Lundholm M., Mattsby I. (1976). Sewage worker’s syndrome. *Lancet* 8, 478.
- Shuval H.I., Guttman-Bass N., Applebaum J., Fattal B. (1989a). Aerosolized enteric bacteria and viruses generated by spray irrigation of wastewater. *Water Science Technology* 21, 131-135.
- Shuval H.I., Wax Y., Yekutieli P., Fattal B. (1989b). Transmission of disease associated with wastewater irrigation: a prospective epidemiological study. *American Journal of Public Health* 79, 850-852.
- Sigsgaard, T., Bach, B., and Malmros, P., 1990, Respiratory impairment among workers in a garbage-handling plant, *American Journal of Industrial Medicine*, 17:92-93.

Este documento se debe citar como:

Sánchez-Monedero, M. A., Aguilar, M. I., Fenoll, R. y Roig, A. (2007). **Generación de bioaerosoles en estaciones depuradoras de aguas residuales**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 11-1, pp.37-42, ISSN: 1665-529X.