

APROXIMACIÓN A LA PROBLEMÁTICA DEL AIRE INTERIOR

Naiara Rojo

Iker Obregón

Rafael Manrique

Ana Elías

*Department of Chemical and Environmental Engineering, University of the Basque Country,
Alda Urquijo s/n, 48013 Bilbao, Spain*

Abstract

The effects of indoor air quality on human health have arisen great concern within the scientific community during the last three decades. Special attention has been paid to the so-called "sick building syndrome", which is one of the many expressions used by occupants to describe symptoms of reduced comfort or health.

Air purification is one of the most promising options to improve indoor air quality. Nonetheless, the application of traditional pollution control methods like adsorption by activated carbon or thermal oxidation is not recommended. In the former case, pollutants are merely transferred from gaseous phase to solid phase and in the latter, high temperatures (200-1200 °C) are required to achieve an optimum efficiency.

Biofiltration is a promising technology since it is typically used for the treatment of large volumes of air streams containing low concentration of pollutants. It is a cost effective and environmentally friendly alternative as no secondary waste stream is produced.

This study focuses the selection and characterization of typical indoor environments. Thus, indoor air composition and concentration range will be established and the viability of using biofiltration as a treatment technology will be discussed.

Keywords: *Indoor air quality, VOC, Air biofiltration, Sick building syndrome*

Resumen

En los últimos años ha cobrado especial relevancia el término "síndrome del edificio enfermo". Este término abarca un amplio rango de síntomas o enfermedades que sufren las personas que trabajan o habitan en dicho edificio y que se atribuyen a la contaminación del aire interior. A modo de ejemplo, se estima que la contaminación de ambientes interiores causa entre 65000 y 150000 muertes al año en Estados Unidos.

Los métodos aplicados tradicionalmente para el control de la contaminación atmosférica, como son la adsorción con carbón activo o la oxidación térmica, no son aplicables para ambientes interiores ya que o simplemente transfieren los contaminantes entre fases o requieren altas temperaturas (200-1200 °C) para obtener rendimientos óptimos.

Por el contrario, la biofiltración se caracteriza por ser eficaz para el tratamiento de grandes caudales con cargas orgánicas bajas pero con elevadas concentraciones de olor, no teniendo requisitos energéticos elevados ni generándose residuos secundarios tóxicos.

El presente trabajo se centrará en dos objetivos: la selección y caracterización de atmósferas interiores, donde se establecerá el caudal, composición y concentración de los contaminantes típica de estos espacios, para posteriormente analizar la viabilidad del tratamiento por biofiltración de dichas corrientes.

Palabras clave: *calidad del aire interior; Biofiltración de corrientes gaseosas; COV; Síndrome del edificio enfermo*

1. Introducción

El síndrome del edificio enfermo (Sick Building Syndrome, SBS) fue reconocido como dolencia médica por primera vez por la organización Mundial de la Salud (World Health Organization, WHO) en el año 1983. Se puede definir como un conjunto de problemas de salud que afectan a nivel de las membranas mucosas (irritación de ojos, nariz y garganta), de la piel y síntomas generales, como por ejemplo, dificultad respiratoria, falta de concentración, dolor de cabeza y cansancio. Una peculiaridad de estos síntomas es que generalmente mejoran tras unas horas después de abandonar el edificio (Crook & Burton, 2010). Las causas que provocan este síndrome no han sido totalmente establecidas pero se puede concluir que el SBS y sus efectos de salud asociados se deben a la pérdida de la calidad del aire interior (Indoor Air Quality, IAQ). Muchos estudios apuntan a una acumulación de compuestos químicos y biológicos (microorganismos, mohos, esporas y ácaros, incluyendo la materia particulada), hábitos inadecuados de renovación del aire y a la condición física y estatus físico-social de los ocupantes del recinto (Takigawa et al., 2009).

Durante la década de los años 70, se entendía que la contaminación del aire interior era reflejo de la contaminación atmosférica exterior y ciertos contaminantes como los óxidos de nitrógeno, ozono, el dióxido de azufre y la materia particulada eran el centro de atención de los estudios de la época (Yocom, Clink & Cote, 1971; Thompson, Hensel & Kats, 1973). A medida que las técnicas analíticas y el nivel de detección de las mismas fueron mejorando, el espectro de compuestos químicos medibles en ambientes interiores se fue ampliando, lo que resulta especialmente aplicable a los compuestos orgánicos.

Diferentes organizaciones (WHO, US EPA o el Observatorio francés para la calidad del aire interior-OQAI) han establecido una lista de contaminantes prioritarios basada en la ubicuidad, concentración y efectos tóxicos de los mismos. Las listas son bastante similares entre sí e incluyen aldehídos, compuestos aromáticos y halogenados y biocidas. Estas listas se verán incrementadas y/o mejoradas a medida que se tenga un mayor conocimiento de los efectos sobre la salud de una exposición continuada a bajas concentraciones de mezclas simultáneas de diferentes contaminantes. Pero, de momento, en la Unión Europea sólo se ha publicado una guía de aire interior para algunos estados miembros, debido sobre todo a falta de información concisa sobre análisis de riesgos y peligrosidad (Stranger, Potgieter-Vermaak & Van Grieken, 2007).

Independientemente del avance analítico a nivel de detección de contaminantes en ambientes interiores o de futuros avances toxicológicos, diversos estudios epidemiológicos han demostrado la complejidad de la relación entre factores propios del edificio o ambiente (confort térmico, luz, humedad, ruido, etc.) y la percepción del bienestar humano. Según las conclusiones del proyecto europeo HOPE, un ambiente interior se considera saludable cuando la combinación de factores físicos, químicos y biológicos son tal que (Bluyssen, Aries & Van Dommelen, 2011):

- No causan o agravan ninguna dolencia en los ocupantes del espacio interior o edificio.
- Aseguran un alto nivel de confort a los ocupantes para el desarrollo de las actividades correspondientes en ese espacio interior.

La importancia de la calidad del aire interior y el deterioro de la misma que se observa en muchos países industrializados se debe principalmente al cambio de costumbres de la población (que pasa más tiempo en lugares cerrados), a la sustitución de los materiales

tradicionales de construcción (como la madera) por otros sintéticos y al cambio de las tendencias constructivas.

Referente al cambio de costumbres, se pueden mencionar tres aspectos destacados: el hábito de fumar (hoy en día decreciente), el aumento radical del tiempo que los ciudadanos pasan en lugares cerrados (hogares, medios de transporte, oficinas, superficies comerciales, etc.) que puede llegar a ser superior al 90% para ciudadanos americanos de grandes urbes y la creciente costumbre de convivir con mascotas en las viviendas, hecho que supone un notable aumento de alérgicos en el aire (Weschler, 2009).

Las tendencias constructivas de las últimas décadas han estado marcadas por el ahorro energético, lo que ha llevado a construir edificios más herméticos donde la renovación del aire interior es deficitaria. Sundell (2004) concluyó que una renovación del aire interior inferior a 25 L s^{-1} por persona en lugares comerciales y centros públicos estaba relacionada con un aumento de las bajas de corta duración del personal. También el aumento de la instalación y uso del aire acondicionado es responsable de la ventilación deficiente. Actualmente más del 75% de los hogares en USA tienen este sistema bien de manera individualizada o centralizada y su uso más generalizado ha favorecido el aumento del asentamiento humano en lugares desérticos como Arizona o Nevada. Con el fin de ahorrar energía, el aire interior es recirculado lo que conlleva un ratio de intercambio de aire con el exterior claramente insuficiente. Este hecho explica que en algunos estudios realizados en edificios de USA no se aprecien diferencias en la calidad de aire en verano o invierno. Sin embargo, en varias ciudades europeas (Milan, Copenhagen, Dublin, Atenas y Nicosia) se encontró una mayor contaminación interior en invierno que en verano (Missia et al., 2010), debido principalmente a un hábito diferente de ventilación y a un uso menos generalizado del aire acondicionado.

Según algunos estudios, aproximadamente el 40% de la contaminación global del aire interior de los edificios es atribuible directamente a los materiales empleados en la construcción y en el acondicionamiento interior (muebles, alfombras, etc.) (Missia et al., 2010). Varios tipos de materiales constructivos han “invadido” muchas viviendas y edificios en países industrializados a partir de los años 50: el contrachapado o madera composite en sustitución de la madera tradicional, el PVC para las tuberías o conducciones en sustitución (parcialmente) de las tuberías de cobre y para el cableado como aislante, las placas de yeso prensado (o pladur[®]) y los suelos de vinilo (principalmente en USA).

La madera prensada o contrachapada fue empleada por primera vez por los egipcios en el año 3500 a. C., pero tal y como la conocemos hoy en día fue una invención de Immanuel Nobel, padre de Alfred Nobel (inventor de la dinamita y fundador de los conocidos premios Nobel de la Academia Sueca). Aunque actualmente existen muchos tipos de este material, el más común (y económico) en usos interiores emplea una cola para adherir las capas basada en urea y formaldehído (en usos exteriores la cola es de fenol-formaldehído). Dada la peligrosidad del formaldehído (y su clasificación como posible cancerígeno) las emisiones de este compuesto han sido considerablemente reducidas en estos materiales, pero no eliminadas completamente (Hematabadi et al., 2012). En cuanto a los materiales de PVC, se utilizan plastificantes y aditivos como el di-2-etilhexil-ftalato que son emitidos al aire a lo largo del tiempo. En cuanto al pladur[®] (o drywall), una gran polémica surgió en USA a partir de importantes partidas de este material importado en el 2001 que se empleó para la reconstrucción rápida de las casas destruidas por los huracanes Katrina y Rita. Durante los años 2005-2008, se recibieron muchas quejas de propietarios de casas en las que se apreció olor a huevos podridos y oscurecimiento de piezas metálicas además de problemas de salud como dificultad respiratoria y dolor de cabeza. Los contaminantes químicos medidos en estas viviendas fueron principalmente sulfuro de hidrógeno, sulfuro de carbonilo y disulfuro de carbono. Los estados más afectados fueron Florida y otros del sur, donde

además de la contaminación química concurría una elevada humedad que agravó más el problema.

El aumento de la sociedad del bienestar en muchos países y la rápida urbanización experimentada por grandes potencias como China ha promovido las actividades de decoración y renovación de los interiores de las viviendas y edificios en general. Por ejemplo, hasta la Segunda Guerra Mundial las alfombras se tejían con algodón y lana. A partir de los años 50, se introdujeron en el mercado las alfombras de nylon, rayon y acrílicas. A partir de los 60, aparecieron las alfombras de poliéster y polipropileno y la industria mejoró la oferta añadiendo refuerzos y retardadores de fuego. Las pinturas al agua empezaron a sustituir a las basadas en disolventes hace tres décadas, lo que supuso una considerable reducción en la emisión de compuestos volátiles; sin embargo actualmente la pinturas de latex han ganado popularidad a pesar de que emplean isobutiratos como agentes aglomerantes. Las pinturas “verdes” basadas en ingredientes naturales también contienen compuestos orgánicos insaturados como el limoneno que pueden reaccionar con el ozono, dando lugar a aerosoles orgánicos secundarios (Lamorena et al., 2007). Otros elementos que contribuyen negativamente a la calidad del aire interior son cierto tipo de mobiliario (barnices, espumas, etc.), productos de limpieza, electrodomésticos y aparatos electrónicos.

2. Compuestos químicos usuales

En la tabla 1, se muestran algunos de los contaminantes químicos más usuales encontrados en atmósferas interiores y las fuentes comunes de emisión.

Los recintos donde se ha analizado la problemática y calidad del aire interior son muy variados. Los más comunes son las viviendas, que incluyen principalmente las habitaciones, salas de estar y cocinas (este último recinto presenta peculiaridades interesantes). También es común el estudio en escuelas y edificios públicos. Existen datos sobre habitaciones de hospitales, oficinas informáticas, residencias de la tercera edad, coches y concesionarios de coches (Eberlein-Konig et al., 2002; Esteve-Turrillas, Pastor & de la Guardia, 2007; Walgraeve et al., 2011).

Los ambientes interiores de cocinas constituyen un ámbito peculiar debido a que los contaminantes que se encuentran son reflejo de los hábitos de cocinar los alimentos además del combustible empleado (Kim et al., 2011). En estos recintos es característico la presencia de CO₂, CO y materia particulada (PM₁₀ y PM_{2.5}). Huang et al. (2011) estudiaron el ambiente de una cocina de una vivienda que empleaba un combustible con un 49% hidrógeno y 28% metano y otra que empleaba un combustible 75% propano y 25% butano. Durante la actividad de cocinado se detectaron cantidades elevadas de CO₂ similares en ambas viviendas pero la cantidad de CO fue mayor para la cocina que empleó propano y butano, lo que está relacionado con la posible combustión incompleta en este segundo caso. La presencia en ambas viviendas de compuestos de C2 (etano, eteno y etino) se asocian a los productos de calentamiento de la carne, grasa y carbón empleado en algunos restaurantes (Mugica et al., 2001). La presencia de acroleína se asoció a frituras con aceites vegetales. Actividades como la tostación de café emiten elevadas cantidades de sulfuro de hidrógeno (2398 ppb), metanotiol (2070 ppb) y acetaldehído (5233 ppb) (Kabir et al., 2010). Otros compuestos presentes en las cocinas fueron formaldehído, tolueno, hexanal y acetona.

Las habitaciones de hospitales presentan algunos contaminantes que no son muy habituales en las viviendas como por ejemplo el óxido de etileno que se utilizaba para esterilizar. Las oficinas donde hay fotocopiadoras, equipos informáticos y otros aparatos también constituyen ambientes particulares donde se han encontrado cantidades elevadas de ozono, PM₁₀, tolueno, etilbenceno, xileno y estireno. De hecho, Lee, Lam & Fai (2001) encontraron

que la emisión de ozono y de COVs era significativamente más elevada en impresoras láser que en impresoras de chorro de tinta.

Considerando los ambientes interiores más estudiados o más sensibles en relación a la calidad del aire, podríamos citar las escuelas, las viviendas, las residencias de la tercera edad y edificios públicos (Missia et al., 2010; Sarigiannis et al., 2011; Walgraeve et al., 2011). En estos casos se tiene en cuenta la edad del edificio, la fecha de la última remodelación, su localización en zona urbana o rural y el tipo de acceso.

Tabla 1: Algunos de los compuestos químicos presentes en ambientes interiores y sus posibles fuentes de emisión

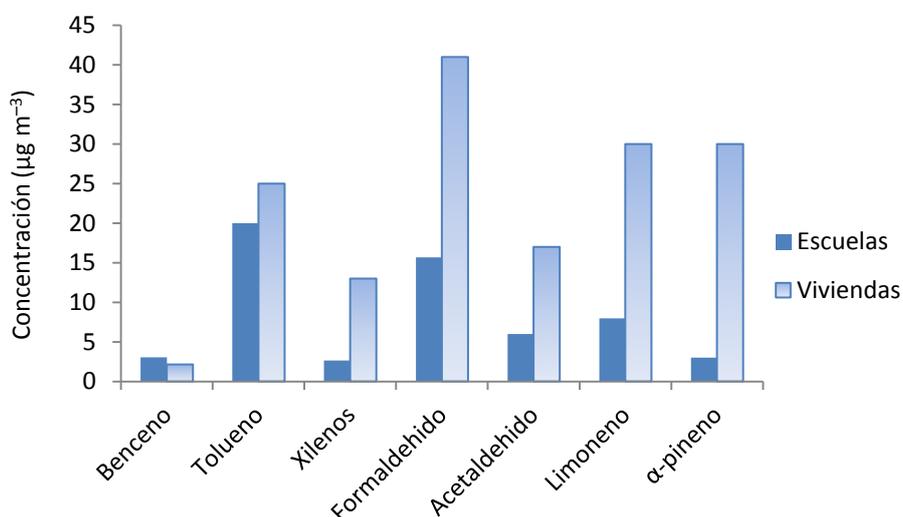
Compuesto	Fuentes posibles de emisión
Hexano, heptano	Adhesivos para el suelo, disolventes, alfombras sintéticas
Octano	Adhesivos para el suelo, resinas sintéticas, disolventes, alfombras sintéticas
Decano	Adhesivos para el suelo, disolventes, productos de PVC, resinas sintéticas, alfombras sintéticas
Undecano	Disolventes, productos de PVC, resinas sintéticas, alfombras sintéticas
Dodecano y ciclohexano	Disolventes, resinas sintéticas, alfombras sintéticas
Benceno	Tabaco, quema de incienso, productos plásticos
Tolueno	Tráfico exterior, adhesivos del suelo, resinas sintéticas, tabaco, agentes de limpieza, disolventes, pinturas
Etilbenceno	Tráfico exterior, adhesivos del suelo, resinas sintéticas, tabaco, agentes de limpieza, disolventes
Xilenos (o, m, p)	Tráfico exterior, adhesivos del suelo, resinas sintéticas, tabaco, agentes de limpieza, disolventes, productos de PVC, pinturas
Etiltoluenos (2, 3, 4)	Resinas sintéticas, disolventes, alfombras
Estireno	Tabaco, plásticos, sellado de humedades, desinfectantes, pinturas, tejidos de latex
Tricloroetileno	Limpieza en seco
Tetracloroetileno	Limpieza en seco de tejidos y ropa
Pineno (α)	Maderas, agentes de limpieza, disolventes de pinturas y barnices
Limoneno	Aceites de fragancias, maderas, productos de limpieza, abrillantadores
Formaldehido	Productos para preservar la madera, espumas de decoración, resinas adhesivas, tabaco, pinturas, desinfectantes
Acetaldehido	Adhesivos, desodorantes,
Dimetilftalato	Plásticos (cepillos de dientes, piezas de coches..), herramientas, cosmética, insecticidas
Naftaleno	Productos repelentes de humedad, bolas antihumedad, insecticidas
CO ₂ , CO	Combustión en cocinas

Gallego et al. (2009) analizaron el ambiente interior de viviendas en las que los ocupantes se habían quejado de molestias y detectaron 130 compuestos diferentes de COVs, siendo los grupos mayoritarios los alcanos (32%) y los hidrocarburos aromáticos (17%) seguidos por los ésteres y alquenos (7%) y aldehídos, alcoholes, terpenos y cetonas (5%). La presencia de etanol, ácido acético y 1-metoxi-2-propanol, que no son compuestos típicos en viviendas y la elevada cantidad de otros contaminantes, se debía a la presencia de disolventes industriales almacenados en un edificio contiguo.

Según el informe INDEX de la Comisión Europea, los principales compuestos orgánicos que prioritariamente deberían ser regulados en ambientes interiores (viviendas y edificios públicos) en la Unión Europea son benceno, tolueno, xilenos, estireno, acetaldehído, formaldehído, naftaleno, limoneno, α -pireno y amoníaco (Sarigiannis et al., 2011).

En función de la frecuencia de aparición los contaminantes y a modo de resumen, estos se podrían agrupar en tres categorías principales: el grupo de los compuestos orgánicos aromáticos simples (que incluiría como representativos al benceno, tolueno y xilenos), el grupo de los aldehídos (que incluiría los dos compuestos más frecuentes, el formaldehído y el acetaldehído) y el grupo de los terpenos (que incluiría como representativos al limoneno y al α -pireno). En base a esta agrupación, se han representado los valores medios más habitualmente encontrados en viviendas y escuelas, que han sido publicados en dos extensos trabajos recopilatorios de información (Missia et al., 2010; Sarigiannis et al., 2011) (ver Figura 1). Excepcionalmente se han publicado valores máximos de $1400 \mu\text{g m}^{-3}$ de limoneno, $358 \mu\text{g m}^{-3}$ de tolueno, $288 \mu\text{g m}^{-3}$ de formaldehído o $393 \mu\text{g m}^{-3}$ de α -pireno pero que están ligados a situaciones puntuales (muestreo inmediato al uso de productos de limpieza, viviendas de muy reciente construcción, quirófanos, etc.).

Figura 1: Valores medios habituales para una serie de compuestos ilustrativos de la composición en ambientes interiores de escuelas y viviendas europeas. Datos tomados de Missia et al., 2010 y Sarigiannis et al., 2011



Por último, es de destacar que excepto para el formaldehído, todos los demás compuestos incluidos en los grupos resumidos se encuentran en concentraciones más elevadas en países europeos del sur que en países del norte y centro europeos. Este hecho se ha explicado en base a las mayores temperaturas ambientales de los países del sur, que repercutiría en una mayor volatilización de los compuestos y en base a las diferentes técnicas de ventilación (ventilación mecánica en el norte y ventilación natural en el sur) (Sarigiannis et al., 2011).

3. Posibilidades de tratamiento del aire interior

Las posibilidades de mejora de la calidad del aire interior incluyen tres métodos de aplicación: aumento de la ventilación, control o eliminación de las fuentes de emisión y tratamiento de limpieza del aire mediante la aplicación de tecnología que no siempre es eficaz para tratar la gran variedad de compuestos que simultáneamente pueden encontrarse en concentraciones bajas.

Los métodos de tratamiento se pueden dividir en tecnologías empleadas al día de hoy y nuevos métodos en fase experimental. Entre los que se encuentran establecidos están: la filtración de partículas, la adsorción, la ozonización, la fotocatalisis y la precipitación electrostática con ionización.

En la tabla 2 se recogen algunas características de estos métodos ya implantados que se aplican sin tener que aislar el recinto, como ocurriría en el caso de tratamientos térmicos o químicos más energéticos.

Tabla 2: Métodos empleados en la purificación del aire interior

Métodos	Fundamento	Ventajas	Inconvenientes
Filtración	Paso forzado de aire a través de filtros de fibra de vidrio, algodón, y materiales sintéticos (poliolefinas y otros).	Retención de materia particulada. Con filtros HEPA se consigue la retención de partículas superiores a 0.3 µm.	Sustitución de los filtros (cada 3 meses en algunos casos), posibilidad de acumulación de microorganismos y moho, saturación y pérdida de eficacia con el uso.
Adsorción	Paso forzado de aire a través de fibra de carbón activo (ACF), silicagel o zeolitas con el objeto de retener los contaminantes.	Los filtros que contienen (ACF) son eficaces para retener COVs, son de larga duración si se regeneran periódicamente, y el proceso de desorción es rápido.	No es útil para la retención de formaldehído. La regeneración más eficaz depende de la frecuencia, el caudal de aire y la temperatura (150 °C). Consumo energético de regeneración. Simplemente retienen los contaminantes transfiriéndolos de fase.
Ozonización	Se basa en la generación de ozono que es un fuerte oxidante. Se utiliza junto con un adsorbente.	Utilizado para desodorizar y desinfectar habitaciones de hoteles, edificios comerciales y recintos afectados por el fuego. Altas eficacias para destruir esporas.	Reducidas eficacias de eliminación de COVs. Posibilidad de reacciones entre el ozono residual y COV insaturados que producen otros intermedios como aldehídos o ácidos orgánicos. No recomendados por algunas asociaciones médicas.

Fotocatálisis	Empleo conjunto de un catalizador y luz ultravioleta para degradar los contaminantes a vapor de agua y CO ₂ principalmente. El catalizador más utilizado suele ser de TiO ₂ . En las reacciones redox participan radicales OH y oxígeno molecular.	El fotocatalizador empleado está reconocido como seguro (se emplea en pasta de dientes y otros); es eficaz a temperatura ambiente; la reacción de oxidación es más suave que empleando ozono u otros. Gran oferta (más de 2000 compañías ofertan productos para diversos usos).	Falta de información detallada sobre posibles compuestos intermedios de degradación. El vapor de agua podría inhibir la eficacia del proceso.
Precipitación electrostática con ionización (EAC powered electronic filters)	Son pequeños filtros precipitadores donde el polvo y el aire son ionizados en un campo eléctrico de alto voltaje. La materia particulada precipita en unas superficies (platos) en el fondo del filtro.	Se recomienda utilizar un prefiltro lavable y un segundo EAC para lograr altas eficacias con baja resistencia al paso del aire.	Pierden eficacia cuando los platos se saturan de polvo. Pueden generar pequeñas cantidades de ozono y partículas cargadas que no se depositan.

La destrucción de contaminantes por oxidación térmica catalítica reduce los compuestos químicos a H₂O y CO₂, lo que podría ser muy interesante desde el punto de vista ambiental y de salud humana. Sin embargo son necesarias temperaturas de entre 200 y 1200 °C para que resulte eficaz y hoy en día sería sumamente costoso para el tratamiento de bajas concentraciones de contaminantes, tal y como se encuentran en ambientes interiores.

Entre los métodos emergentes o experimentales están: la separación por membranas, la oxidación enzimática, la purificación botánica y los métodos de filtración biológicos. En la Tabla 3 se presenta un resumen de dichas posibilidades de tratamiento.

Tabla 3: Métodos experimentales de tratamiento del aire interior

Métodos	Fundamento	Ventajas	Inconvenientes
Separación por membranas	Los contaminantes pasan a través de una membrana y son transferidos a un fluido de alta afinidad.	Es aplicable a concentraciones más elevadas de COVs de lo que resulta habitual en ambientes interiores.	No destruyen los contaminantes sino que simplemente son transferidos de fase.
Purificación botánica	Consiste en la degradación de los contaminantes por microorganismos que se desarrollan en la zona radicular de ciertas plantas.	Se puede aplicar a cultivos hidropónicos que contienen además carbono activo. Si se inyecta el aire al sistema radicular, aumenta su eficacia.	Requerimientos altos de espacio para las plantas (y sus raíces). Necesita más desarrollo y mejora.
Oxidación enzimática	Los contaminantes pasan a una fase acuosa donde son	Método biológico que biodegrada (destruye) los contaminantes en	Limitada eficacia por la solubilidad en fase acuosa. Poca

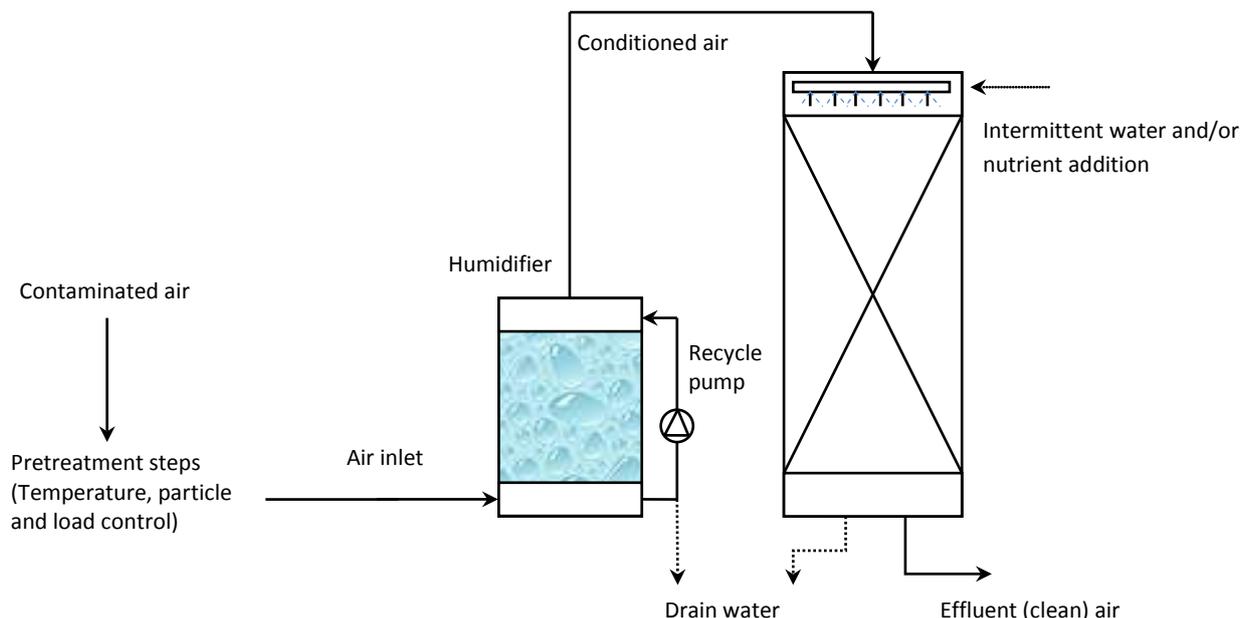
	degradados por enzimas.	fase acuosa.	información disponible.
Métodos biológicos (biofiltros y filtros biotrickling)	Se basa en la capacidad de los microorganismos en utilizar los contaminantes como fuentes de carbón, nutrientes y/o energía y en degradarlos cometabólicamente mediante enzimas.	Los contaminantes son biodegradados y no se transfieren de fase. Son económicos.	Aplicación limitada a la biodegradabilidad del compuesto a tratar. Toxicidad sinérgica entre compuestos. Necesidad de mantenimiento y control de la biomasa. Dificultad por la gran variedad de compuestos a tratar simultáneamente.

4. Métodos biológicos

Los biofiltros (ver Figura 2) son bioreactores donde una corriente gaseosa contaminada se hace pasar a través de un lecho sólido poroso que contiene biomasa activa capaz de degradar el contaminante alimentado. En los filtros biotrickling, los microorganismos crecen sobre un material inerte y una disolución acuosa que contiene nutrientes para el crecimiento microbiano se hace recircular a través del soporte. La corriente gaseosa contaminada se alimenta en contracorriente a la disolución y los contaminantes pasan por difusión a la fase acuosa donde son biodegradados. No está claro cuál de las dos posibilidades de bioreactor sería la más aconsejable para su empleo en el tratamiento de aire interior. Por un lado, los biofiltros serían adecuados para bajas concentraciones de contaminantes que tengan una solubilidad en agua más limitada. Los filtros biotrickling permitirían tratar concentraciones mayores de compuestos solubles y controlar mejor el pH del medio cuando sea necesario.

En cualquier caso, durante el proceso de biodegradación, la concentración del compuesto orgánico en el biofilm (biopelícula acuosa) donde se encuentra la biomasa tiene un importante impacto en la actividad degradadora, y en general, en la velocidad de eliminación del contaminante. Si la concentración del compuesto disponible en el biofilm desciende por debajo de un nivel crítico, la biomasa podría estar permanecer activa siempre que esta situación no se alargue demasiado en el tiempo. Por lo tanto, dado que la característica de los ambientes interiores es la baja concentración de una amplia variedad de compuestos, es imprescindible conocer los valores límite de concentración que aseguren el crecimiento microbiano y la consecuente biodegradación.

Figura 2: Esquema de un biofiltro convencional



El primer paso para que el contaminante esté accesible a la biomasa es la transferencia desde la fase gaseosa a la fase acuosa o biofilm donde tiene lugar verdaderamente la degradación. En el equilibrio, la distribución de cualquier compuesto entre la fase gas y la acuosa viene determinada por la ley de Henry, que se puede expresar:

$$C_{aq} = P_i / H_i \quad (1)$$

Donde P_i es la presión parcial del compuesto a tratar en la fase gas, C_{aq} es la máxima cantidad de tolueno en la fase acuosa disponible para la biomasa y H_i es la constante de Henry. Para el caso del tolueno con un valor de H_i de $6.67 \cdot 10^{-3} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$, el valor de C_{aq} resultaría $2\text{-}60 \text{ ng dm}^{-3}$ bajo condiciones normales de presión y temperatura. Guieysse et al. (2008) establecieron que bajo eficacias de eliminación del 90% de tolueno en condiciones estacionarias, la cantidad disponible en el biofilm sería de $0.2\text{-}6 \text{ ng dm}^{-3}$ lo que resultaría insuficiente si se compara con valores límite de crecimiento bacteriano en agua de $0.1\text{-}0.9 \mu\text{g dm}^{-3}$ (van der Kooij, Vrouwenvelder & Veenendaal, 1995; Roch & Alexander, 1997).

Sin embargo, a pesar de esta limitación, los microorganismos podrían emplear otros COVs presentes en el caudal gaseoso alimentado empleándolos como fuente de energía o como sustrato a degradar, lo que aseguraría la vida eficaz del biofiltro. Esta solución depende de que se obtenga una biomasa versátil con capacidad degradadora. En el caso de hidrocarburos aromáticos simples como el tolueno, etilbenceno y xilenos, algunos autores han arrancado biofiltros aclimatándolos exclusivamente a tolueno. Posteriormente, dichos biofiltros han mostrado elevadas capacidades de eliminación para compuestos similares como el etilbenceno y xileno (Gallastegui et al, 2012). Debido a la gran cantidad de compuestos simultáneamente presentes en el aire interior, sería difícil obtener y mantener un inóculo activo que tuviera la capacidad catabólica universal de degradar todos esos compuestos.

Otro reto sería el mantenimiento de esa variedad microbiológica ya que la biomasa puede perder su versatilidad/capacidad metabólica si los contaminantes concretos no se alimentan con cierta regularidad, lo que en el caso de aplicación no está asegurado. Parece claro que

el desarrollo de métodos biológicos para el tratamiento del aire interior requiere más investigación centrada en los mecanismos de aclimatación, supervivencia y reconocimiento, acumulación e ingesta del sustrato a concentraciones traza. Los estudios publicados hasta ahora emplean concentraciones de aclimatación del nivel de ppm (adecuados por otro lado para aplicaciones industriales) (Elias et al, 2010), pero para aire interior el nivel de la carga másica sería de ppb. En cualquier caso, tal y como sugieren Guiyese et al. (2008), la cuestión no sería tanto si se produjera el crecimiento microbiano, sino si esa biomasa fuera capaz de eliminar la variedad de VOCs alimentados.

Por otro lado, los sistemas biológicos podrían emitir polvo, microorganismos y lixiviados acuosos, aunque estos problemas tendrían solución con la instalación de uno o varios filtros de partículas y o membranas.

Otro problema adicional a tener en cuenta es la baja solubilidad de algunos compuestos presentes en el aire como son algunos alcanos. Una solución son los reactores de doble fase líquida en los que se emplea un fase orgánica inmiscible con la acuosa para conseguir la accesibilidad de compuestos hidrofílicos como el hexano (Muñoz et al., 2007).

Otra alternativa a las bajas concentraciones en el influente es el empleo de carbono activo u otros adsorbentes universales a la entrada del biofiltro que actúen como sistema previo de retención y almacén a la vez (adsorción-desorción).

Conclusiones

El cambio de costumbres sociales, de condicionantes arquitectónicos y de tipos de materiales empleados en la construcción y acondicionamiento de interiores marca una tendencia claramente diferenciada en los contaminantes químicos habituales presentes en las atmósferas interiores con respecto a 30 años atrás. Los métodos fisicoquímicos empleados en el control de la contaminación atmosférica industrial no son directamente aplicables en ambientes interiores donde la característica principal es la variedad de compuestos simultáneos a bajas concentraciones (a nivel de ppb).

Sin embargo, a pesar de esta amplia variedad de sustancias, se pueden destacar tres categorías principales: el grupo de los compuestos orgánicos aromáticos simples (siendo los más representativos el benceno, tolueno y xilenos), el grupo de los aldehídos (formaldehído y acetaldehído principalmente) y el grupo de los terpenos (limoneno y α -pireno entre otros), que se encuentran habitualmente en ambientes sensibles como escuelas y viviendas.

Ante el reto tecnológico que supone la búsqueda de métodos de tratamiento sostenibles que sean viables técnica y económicamente, la biofiltración emerge como una clara alternativa cuyo atractivo radica en el moderado coste de fabricación, operación y mantenimiento, la facilidad de construcción, la eficacia de tratamiento para una relativa variedad de compuestos biodegradables, así como la calificación de tecnología verde respetuosa con el medio ambiente y la salud.

Agradecimientos

Agradecemos la financiación recibida por el Gobierno Vasco a través de los Proyectos: BIOADSOR-SAIOTEK S-PE11UN008, TAICAB-Comunidad Transpirenaica-(BOPV nº 247-2011) y BERRILUR-Etortek III IE10-273

Referencias

Bluysen, P.M., Aries, M., & Van Dommelen, P. (2011). Comfort of workers in office buildings: The European HOPE project. *Building and Environment*, 46, 280-288.

Crook, B., & Burton, N.C. (2010). Indoor moulds, Sick Building Syndrome and building related illness. *Fungal Biology Reviews*, 24, 106-113.

Eberlein-Konig, B., Prybilla, B., Kuhn, P., Golling, G., Gebefugi, I., & Ring J. (2002). Multiple chemical sensitivity (MCS) and other allergological, environmental and psychological investigations in individuals with indoor air related complains. *Int J Hyg Environ Health*, 205, 231-220.

Elias, A., Barona, A., Gallastegui, G., Rojo, N., & Gurtubay, L. (2010). Preliminary acclimation strategies for successful start-up in conventional biofilters. *Journal of the Air Waste Management Association*, 60, 959-967.

Esteve-Turrillas, F. A., Pastor A., & de la Guardia, M. (2007). Assessing air quality inside vehicles and at fillins stations by monitoring benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes with the use os semi permeable membrane devices. *Analytical Chimica Acta*, 593, 108-116.

Gallastegui, G., Barona, A., Rojo, N., Gurtubay, L., & Elias, A. (2012). Comparative response of two organic biofilters treating ethylbenzene and toluene after prolonged exposure. *Process Safety and Environmental Protection* (In press).

Gallego, E., Roca, X., Perales, J. F., & Guardino, X. (2009). Determining indoor air quality and identifying the origin of odour episodes in indoor environments. *Journal of Environmental Sciences*, 21, 333-339.

Guieysse, B., Hort, C., Platel, V., Munoz, R., Ondarts, M., & Revah, S. (2008). Biological treatment of indoor air for VOC removal: Potential challenges. *Biotechnology Advances*, 26, 398-410.

Hematabadi, H., Behrooz, R., Xhakibi, A., & Arabi, M. (2012). The reduction of indoor air formaldehyde from wood based composites using urea treatment for building materials. *Construction and Building Materials*, 28, 743-746.

Huang, Y., Ho, S. S. H., Ho, K. F., Lee, S. C., Yu, J. Z., & Louie, P. K. K. (2011). Characteristics and health impacts of VOCs and carbonyls associated with residential cooking activities in Hong Kong. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 344-351.

Kabir, E., Kim, K. H., Ahn, J. W., Hong, O. F., & Sohn, J.R. (2010). Barbecue charcoal combustion as a potential source of aromatic volatile organic compounds and carbonyls. *Journal of Hazardous Materials*, 174, 492-499.

Kim, K., H., Pandey, S. K., Kabir, E., Susaya, J., & Brown, R. J. C. (2011). The modern paradox of unregulated cooking activities and indoor air quality. *Journal of Hazardous Materials*, 195, 1-10.

Lamorena, R. B., Jung, S. G., Bae, G. N., & Lee, W. (2007). The formation of ultra-fine particles during ozone initiated oxidation with terpenes emitted from natural paint. *Journal of Hazardous Materials*, 141, 245-251.

Lee, S. C., Lam, S., & Fai, H.K. (2001). Characterization of VOCs, ozone, and PM₁₀ emissions from office equipment in an environmental chamber. *Building and Environment*, 36, 837-842.

Missia, D. A., Dametriou, E., Michael, N., Tolis, E. I., & Bartzis J.G. (2010). Indoor exposure from building materials: A field study. *Atmospheric Environment*, 44, 4388-43395.

Mugica, V., Vega, E., Chow, J., Reyes, E., Sanchez, G., Arriaga, J., Egami, R., & Watson, J. (2001). Speciated non-methane organic compounds emissions from food cooking in Mexico. *Atmospheric Environment*, 35, 1729-1734.

- Munoz, R., Villaverde, S., Guieysse, B., & Revah, S. (2007). Two phase partitioning bioreactors for the treatment volatile organic compounds. *Biotechnological Advances*, 25, 410-422.
- Roch, F., & Alexander, M. (1997). Inability of bacteria to degrade low concentrations of toluene in water. *Environmental and Toxicological Chemistry*, 16, 1377-1383.
- Sarigiannis, D., Karakitsios, S., Gotti, A., Liakos, I. L., & Katsoyiannis, A. (2011). Exposure to major volatile organic compounds and carbonyls in European indoor environments and associated health risk. *Environmental International*, 37, 743-765.
- Stranger, M., Potgieter-Vermaak, S. S., & Van Grieken, R. (2007). Comparative overview of indoor air quality in Antwerp, Belgium. *Environment International*, 33, 789-797.
- Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air*, 14, 51-58.
- Takigawa, T., Wang, B. L., Sakano, N., Wang D. H., Ogino, K., & Kishi, R. (2009). A longitudinal study of environmental risk factors for subjective symptoms associated with sick building syndrome in new dwellings. *Science of the Total Environment*, 407, 5223-5228.
- Thompson, C. R., Hensel, E. G., & Kats, G. (1973). Outdoor-indoor levels of six air pollutants, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 23, 881-886.
- van der Kooij, D., Vrouwenvelder, H. S., & Veenendaal, H. R. (1995). Kinetic aspects of biofilm formation on surfaces exposed to drinking water. *Water Science and Technology*, 32, 32-61.
- Walgraeve, C., Demeestere, K., Dewulf, J., Van Huffel, K., & Van Langenhove, H. (2011). Diffusive sampling of 25 volatile organic compounds in indoor air: Uptake rate determination and application in Flemish homes for the elderly. *Atmospheric Environment*, 45, 5828-5835.
- Weschler, A. (2009). Changes in indoor pollutants since the 1950s. *Atmospheric Environment*, 43, 153-169.
- Yocom, J.E., Clink, W.L., & Cote, W.A. (1971). Indoor/outdoor air quality relationships. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 21, 251-259.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Ana Elías
Phone: + 34 946 01 4087
E-mail address: ana.elias@ehu.es