

Bioindicadores de la contaminación atmosférica

María Lara Jiménez

Resumen—La presencia de contaminantes en el aire es un factor de gran importancia que puede comprometer la salud de plantas, animales y humanos. Es en las grandes ciudades donde tienden a acumularse, debido principalmente a la alta densidad poblacional y al elevado tránsito de vehículos. Estos contaminantes no suelen ser apreciados a simple vista. Sin embargo, existen organismos que responden a la contaminación atmosférica con cambios en su apariencia, algunos de los cuales son proporcionales a la concentración de contaminante, o acumulándolos en su interior: son los denominados bioindicadores. Estos organismos, que pueden ser desde especies voladoras hasta especies sedentarias como los líquenes, proporcionan una información que complementa a los datos obtenidos por métodos fisicoquímicos en las estaciones de monitoreo. No todos los bioindicadores son aptos para detectar un contaminante determinado ni para su cuantificación. En este artículo, se expone una revisión de los bioindicadores y su uso para caracterizar la contaminación atmosférica.

Palabras Claves— Bioindicadores, Calidad del aire, Contaminación atmosférica, Líquenes, Técnicas de monitoreo ambiental

1. INTRODUCCIÓN

Los bioindicadores son organismos o comunidades de organismos que responden a la contaminación ambiental con modificaciones en su apariencia o acumulando contaminantes. A su vez, existen distintos tipos de bioindicadores, como los biomonitores, cuya respuesta fisiológica permite cuantificar la contaminación [1], [2]. Los biomonitores más sensibles pueden ser de tipo óptico y se usan como integradores del estrés causado por los contaminantes y como sistemas de alarma preventivos [3].

Una buena especie indicadora debe tener baja tolerancia y alta sensibilidad a alteraciones del medio ambiente [4]. Tras la exposición a contaminantes, presentarán primero un deterioro fisiológico, luego cambios morfológicos y, a veces, resultará en la desaparición o aparición de algunas especies en el ecosistema [5].

Las redes de medición de la calidad del aire emplean sensores basados en propiedades fisicoquímicas para medir principalmente las concentraciones de SO₂, NO_x, O₃, CO, polvo y arena. Sin embargo, no pueden apreciar los efectos acumulativos o la sinergia de contaminantes [4]. Este tipo de metodología es costosa en términos de inversión y operación de hardware (incluido el soporte logístico para mantenimiento y reparaciones), por lo que el número de estaciones normalmente está limitado a solo unas pocas por ciudad. Los métodos, en la mayoría de los casos, miden solo unos pocos o solo un contaminante [6].

Considerando estos problemas, el uso de organismos indicadores tiene la ventaja de aportar una serie de datos adicionales a los sistemas de monitoreo tradicionales [4], [7]:

- Los niveles medios de contaminación en micropoluyentes gracias a los fenómenos de bioacumulación.

- La incidencia real de contaminantes por estudios toxicológicos y ecotoxicológicos.
- Un enfoque más realista del impacto en la salud ambiental y humana, ya que tendrá en cuenta los conceptos de biodisponibilidad, dosis y exposición.

Los indicadores biológicos han sido ampliamente usados para monitorizar la calidad del aire, permitiendo identificar las áreas de una ciudad con una peor calidad para, posteriormente, proponer un plan para su mitigación [7], [8].

El objetivo de este artículo es elaborar una revisión de los organismos utilizados para el monitoreo de la calidad del aire, en concreto las aves, abejas, árboles y plantas pequeñas, musgos y líquenes, indicando los criterios que conducen a la elección de una u otra para detectar la contaminación atmosférica, así como los nuevos avances en el área.

2. ORGANISMOS INDICADORES

2.1. Aves

Las aves se han propuesto como bioindicadores de contaminación ambiental porque son sensibles a cambios atmosféricos del ecosistema en el que viven y, al recorrer grandes distancias, están muy distribuidos.

Se han realizado estudios de bioacumulación de metales pesados en el gorrión común por estar asociado a hábitats urbanos. Los diferentes tejidos de los gorriones poseen una capacidad variable para acumular metales, siendo el hígado y las plumas de los más acumuladores [9]. Los animales eliminan los contaminantes a través de sequestro en el pelo y las plumas, y que el proceso de muda es el principal medio de excreción de metales pesados [10], por lo que las plumas pueden ser usadas como un indicador de contaminación no invasivo que refleja la exposición a largo plazo de los contaminantes a nivel lo-

cal. El plomo es el metal que muestra mayor acumulación en los tejidos, probablemente debido a que el plomo originado por la combustión del tetraetilo de plomo, un compuesto de la gasolina con plomo, todavía permanece en las ciudades [11].

2.2. Abejas

Las abejas melíferas están expuestas a través de una ruta indirecta o directa a una gran variedad de productos tóxicos debido a su naturaleza recolectora [12]. Sobrevuelan unas 700 hectáreas y cada colonia puede tener 40000 abejas, por lo que el área de muestreo es grande. Además, permiten medir la acumulación de contaminantes en un intervalo de tiempo, y no de forma puntual. Detectan rápidamente el deterioro químico del medio ambiente por la alta mortalidad y la presencia de contaminantes en su cuerpo o en productos de colmena. Son capaces de acumular eficientemente plomo, cromo y cadmio, pero no se ha reportado la presencia de mercurio en todos sus tejidos [13].

2.3. Árboles y plantas pequeñas

Los árboles y arbustos ornamentales se pueden usar como bioindicadores pasivos porque los contaminantes del aire se depositan en sus hojas. Estas hojas se recolectan y, posteriormente, son lavadas con agua destilada y analizadas en laboratorio [1]. Su uso a menudo está relacionado con la necesidad de cubrir una amplia zona de investigación. Además, las especies nativas no necesitan ningún mantenimiento específico. A cambio, la interpretación de los resultados debe tener en cuenta un número importante de criterios relacionados con la heterogeneidad de las condiciones de vida, como la calidad del suelo y las condiciones climáticas [4].

Los efectos directos de la contaminación sobre las plantas abarcan cambios morfológicos, bioquímicos y estructurales, como la defoliación y posible caída de las estructuras reproductivas, la pérdida de pigmentos, el aumento de la concentración de metales pesados en los tejidos, la reducción del área foliar y cambios en los estomas [4].

El ozono causa varios síntomas generales en las especies de hoja ancha, siendo el más común el punteado o pigmentación. Estos síntomas pueden confundirse con los de otras afecciones, como senescencia normal, trastornos nutricionales o patógenos bióticos. En especies coníferas, puede provocar quemaduras en las puntas de las agujas (Figura 1). La longitud de las puntas necróticas se correlaciona con la concentración de contaminantes [14].

La lesión aguda por SO_2 en los árboles de hoja ancha generalmente se manifiesta como necrosis intervenal de marfil a marrón, y bifacial.

Los síntomas del fluoruro consisten en clorosis de diversa gravedad, necrosis o ambas. Los síntomas aparecen primero en los márgenes o puntas de las hojas, donde se acumula el fluoruro. Con una gravedad creciente, los síntomas se extienden hacia la mitad de la hoja.

Para discernir los síntomas de estos contaminantes, las manchas de color entre las venas foliares están asociadas

a una exposición al ozono, las necrosis foliares de flúor se encuentran preferentemente en el borde de las hojas y, en el caso de la exposición a SO_2 , entre las venas [14].



Fig. 1. Agujas de pino blanco quemadas por el ozono. Su concentración atmosférica está relacionada con la longitud de la quemadura. Modificada de [14].

Khavaninzadeh et al. [6] desarrollaron un método de evaluación de síntomas de las hojas dándole un enfoque práctico y novedoso. Determinaron que las lesiones de las hojas y su impacto en las propiedades espectrales pueden usarse como un indicador de la calidad del hábitat urbano. Esta técnica permite un biomonitorio rápido y basado en el sitio de los hábitats urbanos, a diferencia de la determinación de otros parámetros de la hoja como la densidad de la hoja, el área o el número de manchas foliares (necróticas y cloróticas) como indicadores de daño foliar.

El material particulado puede obstruir el poro estomático. Con menos estomas y más pequeños, la planta puede controlar mejor la absorción de contaminantes, pero también puede aumentar su obstrucción y reducirse la fotosíntesis. En zonas contaminada, los árboles tienden a presentar estomas más grandes y con mayor distancia entre ellos [4].

Las plantas pequeñas también son susceptibles a los contaminantes atmosféricos. El ozono daña hasta la necrosis a las plantas de tabaco si su concentración en la atmósfera es muy alta [15]. El crecimiento de *Raphanus sativus* (rábano) y *Vicia faba* (haba) se ve afectado en presencia de ozono y NO_x [16].

Existen estudios que encontraron una correlación entre las concentraciones de metales pesados en los anillos de los árboles y las concentraciones atmosféricas, permitiendo conocer cómo variaron las concentraciones en los últimos 20 años [17].

2.4. Musgos

Los musgos se emplean con frecuencia para medir los depósitos metálicos atmosféricos, además de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y policlorobifenilos (PCBs). Existe una buena correlación entre las concentraciones observadas en los tejidos vegetales y los contenidos de cadmio, cobre, hierro, plomo, zinc y vanadio en el

agua de lluvia [5]. Además, ciertos tipos de briofitas parecen ser bioindicadores óptimos para la producción rápida de un mapa de aproximación con fines de radioprotección [18].

Los musgos se pueden colocar en bolsas de nylon con red, para evitar la asfixia, y colocarse a pocos metros del suelo en sitios donde no aparecen naturalmente. Un inconveniente es que para poner de manifiesto la contaminación de briofitas por metales e hidrocarburos se requieren métodos de extracción delicados [5].

2.5. Líquenes

Los líquenes son el resultado de una relación simbiótica entre un hongo y un alga. Son de crecimiento muy lento y vida larga, y, durante esta vida, no pierden sus características morfológicas. Poseen una amplia distribución desde los polos al ecuador, y crecen en las superficies de sustratos muy variados. Muchas especies no tienen la habilidad de adaptarse ecológica o genéticamente a la condición del medio alterada, de manera que su ausencia es un indicio del problema. Hay especies, aunque muy pocas, que están adaptadas a las áreas urbanas [19].

Anatómicamente, los líquenes no tienen estomas ni cutículas, lo que significa que los gases y aerosoles pueden ser absorbidos por toda su superficie. Acumulan sustancias de su entorno mediante una variedad de mecanismos, que incluyen la captura de partículas, el intercambio iónico, la adsorción extracelular de electrolitos, la hidrólisis y la absorción intracelular [20]. Sin embargo, no poseen mecanismos de eliminación [7]. Se puede usar como bioindicador o como bioacumulador [2].

Por todas estas razones los líquenes son, hasta el momento, los bioindicadores de la calidad del aire más estudiados [3], aunque no fue hasta el siglo XIX que se propuso usarlos a modo de bioindicador [21]. Son sensibles al dióxido de azufre, amoníaco, fluoruros, metales, especies radiactivas, hidrocarburos clorados y lluvia ácida.

En la Figura 2 están marcados todos los países que han realizado estudios con líquenes como bioindicadores. De hecho, muchos países de Europa y Estados Unidos ya emplean líquenes para evaluar la contaminación atmosférica. África y Oceanía son las regiones donde menos trabajos recientes existen en el campo [2].



Fig. 2. Distribución de las investigaciones sobre líquenes como bioindicadores en el mundo. Extraída de [2].

Los líquenes son capaces de captar SO_2 y retener una tercera parte. Los sulfatos y bisulfatos se pueden acumular, provocando daños sustanciales en su membrana e impidiendo la correcta realización de la fotosíntesis, respiración y fijación de nitrógeno. Finalmente, su morfología se deforma y mueren. Estos efectos son los mismos que los que causa la exposición a óxidos de nitrógeno. La suma de las frecuencias de aparición de las especies de líquenes en una determinada superficie se correlaciona muy bien con las concentraciones de SO_2 del aire [19].

Los líquenes no responden directamente a los niveles de nitrógeno que se encuentran en el medio ambiente. Su reacción depende de los niveles de pH en relación con los niveles de amoníaco en la atmósfera [20]. En ambientes con niveles altos de NH_3 , la calidad del aire puede ser erróneamente considerada como buena si se usa una especie nitrofítica de líquen para su monitoreo. Estas especies no son sensibles al SO_2 y para crecer solo necesitan que el pH de la corteza del árbol a la que estén asociados sea básico. El NH_4^+ atmosférico, depositado principalmente como $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, afecta ligeramente el pH de la corteza. Durante la última década, debido a la reducción de SO_2 junto con el aumento de las emisiones de NH_3 por su uso en la agricultura, la concentración atmosférica de NH_4^+ ha disminuido a favor de la concentración de NH_3 . Este NH_3 , con una velocidad de deposición mayor que la del NH_4^+ , sí es capaz de causar un aumento considerable en el pH de la corteza, favoreciendo así el crecimiento de líquenes nitrofíticos a pesar de que existan niveles tóxicos de SO_2 en la atmósfera [22].

También se ha demostrado que los líquenes son buenos acumuladores de metales pesados, y que las concentraciones se correlacionan bien con las concentraciones medidas en la deposición [20]. La toxicidad del metal en los líquenes se evidencia por los efectos adversos en la integridad de la membrana celular, el contenido y la integridad de la clorofila, la fotosíntesis y la respiración, el rendimiento cuántico potencial del fotosistema II, la producción de etileno de estrés, la microestructura, las respuestas de reflectancia espectral, la resistencia a la sequía y la síntesis de varias enzimas, metabolitos secundarios y moléculas de transferencia de energía. Se ha sugerido que determinados líquenes podrían usarse para establecer gradientes de deposición atmosférica de Hg a un nivel geográfico general [23].

El efecto del flúor en los líquenes se manifiesta con concentraciones de 50-70 ppm. Por encima de 80 ppm, se observa clorosis por la concentración de flúor. La capacidad de los líquenes para acumular flúor es una función de la humedad relativa, que determina las condiciones de humedad del talo [24].

El efecto de los oxidantes fotoquímicos como el ozono y el PAN incluye disminuciones en la fotosíntesis, disminución en la distribución de especies, y cambios morfológicos y ultraestructurales [24]. Otros contaminantes, como el queroseno y el benceno emitidos por el tráfico aéreo, tienen menor efecto en los líquenes [3].

Con el objetivo de evitar el uso de técnicas fitosociológicas y simplificar el uso de líquenes, se han desarrollado métodos que calculan el índice de pureza atmosférica

(IPA). El IPA está definido matemáticamente por la siguiente fórmula [25]:

$$IPA = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^n (Q \cdot f)$$

donde n es el número de especies de líquen en cada estación, Q es el índice ecológico de cada especie, y f es el coeficiente de cobertura y frecuencia de especies, y toma valores de 1 a 5. En base a los valores de IPA, se puede determinar el grado de contaminación del ambiente (Tabla 1).

TABLA 1
CONTAMINACIÓN SEGÚN EL RANGO DE IPA

IPA	Contaminación atmosférica
3,51 – 5,06	Muy alta
5,07 – 6,61	Alta
6,62 – 8,17	Media
8,18 – 9,73	Baja
9,74 – 11,28	Muy baja
11,29 – 12,85	No hay

Modificada de [16]

3. CONCLUSIONES

Existen determinados bioindicadores más aptos para la medición de la contaminación atmosférica que otros. Las aves y abejas podrían usarse para determinar la concentración de metales pesados en un área grande de muestreo, pero poco se ha estudiado sobre los efectos del SO₂ o NO_x sobre los mismos. Los árboles se consideran buenos bioindicadores porque presentan cambios en su apariencia que son específicos de contaminantes, aunque podrían confundirse con los síntomas de la senescencia y otros procesos de lesión comunes. Si estos cambios en su aspecto pueden ser útiles o no para cuantificar la contaminación todavía está por determinar, aunque algunos autores han propuesto ya métodos basados en los cambios de reflectancia de la hoja para medirla. En el uso de líquenes, se debe tener en cuenta que algunas especies están adaptadas a áreas urbanas y que las especies nitrofiticas no son buenas indicadoras porque para crecer sólo requieren que el pH de la corteza del árbol al que asocian sea básico. A pesar de ello, la gran mayoría de artículos apoyan el uso de líquenes como bioindicador de la calidad del aire.

El reemplazo de los métodos fisicoquímicos actuales de control de la calidad del aire por el uso de bioindicadores presenta algunas desventajas a tener en cuenta. Los métodos fisicoquímicos pueden automatizarse, mientras que todavía no se han propuesto técnicas automáticas de medición basadas en bioindicadores. Además, se debe determinar la velocidad con la que aparecen las alteraciones del aspecto de los organismos y si esta sería lo suficientemente alta como para detectar la contaminación a tiempo real.

REFERENCIAS

- [1] R. Anze, M. Franken, M. Zaballa, M.R. Pinto, G. Zeballos, M.A. Cuadros, A. Canseco, A. De La Rocha, V.H. Estellano and S., Del Granado, Susana, "Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia", *REDESMA*, vol. 1, pp. 53-74, 2007.
- [2] V.H.M. Estrada and J.M. Nájera, "El uso de líquenes como bio-monitores para evaluar el estado de la contaminación atmosférica a nivel mundial", *Biocenosis*, vol. 25, no. 1-2, pp. 51-67, 2011.
- [3] M. E. Conti and G. Cecchetti, "Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment—a review", *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, vol. 114, no. 3, pp. 471–492, 2001. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(00\)00224-4](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(00)00224-4).
- [4] M. Ferriol, S. Muñoz, H. Merle, A. Garmendia and C. López, "Papel de los árboles ornamentales como bioindicadores de la contaminación atmosférica urbana", *Actas de Horticultura*, no. 68, pp. 292-298, 2014.
- [5] J. Falla, P. Laval-Gilly, M. Henryron, D. Morlot and J. Ferard, "Biological Air Quality Monitoring: a Review", *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 64, no. 3, pp. 627–644, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1006385924945>
- [6] A.R. Khavaninzadeh, F. Veroustraete, J. Buytaert and R. Samson, "Leaf injury symptoms of *Tilia* sp. as an indicator of urban habitat quality", *Ecological Indicators*, vol. 41, pp. 58–64, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.01.014>
- [7] G. Cohn-Berger and M. Quezada, "Líquenes como bioindicadores de contaminación aérea en el corredor metropolitano de la ciudad de Guatemala", *Revista Científica*, vol. 26, no. 1, pp. 20-39, 2016.
- [8] M.I. Käffer, A.T. Lemos, M.A. Apel, J.V. Rocha, S.M. Martins and V.M. Vargas, "Use of bioindicators to evaluate air quality and genotoxic compounds in an urban environment in Southern Brazil", *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, vol. 163, pp. 24–31, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.006>
- [9] E.P. Ochoa, "Aves silvestres como bioindicadores de contaminación ambiental y metales pesados", *CES Salud Pública*, vol. 5, no. 1, pp. 59-69, 2014.
- [10] M.N. Rashed and M.E. Soltan, "Animal hair as biological indicator for heavy metal pollution in urban and rural areas", *Environ Monit Asses*, vol. 110, pp. 41-53, 2005.
- [11] Web de eldiario.es. https://www.eldiario.es/sociedad/gorriones-medidores-presencia-plomo-ciudades_0_773773264.html
- [12] A. Giglio, A. Ammendola, S. Battistella, A. Naccarato, A. Palavicini, E. Simeon, A. Tagarelli and P.G. Giulianini, "*Apis mellifera ligustica*, Spinola 1806 as bioindicator for detecting environmental contamination: a preliminary study of heavy metal pollution in Trieste, Italy", *Environmental science and pollution research international*, vol. 24, no. 1, pp. 659–665, 2017.
- [13] M. Perugini, M. Manera, L. Grotta, M.C. Abete, R. Tarasco, and M. Amorena, "Heavy metal (Hg, Cr, Cd, and Pb) contamination in urban areas and wildlife reserves: honeybees as bioindicators", *Biological trace element research*, vol. 140, no. 2, pp. 170-176, 2011.
- [14] J.M. Skelly, D.D. Davis, W. Merrill, C.A. Cameron, H.D. Brown, D.B. Drummond and L.S. Dochinger, *Diagnosing injury to eastern forest trees: A manual for identifying damage caused by air*

pollution, pathogens, insects and abiotic stresses. Pennsylvania State University, U.S.A., 1987.

- [15] A. Bytnerowicz, W.J. Manning, D. Grosjean, W. Chmielewski, W. Dmuchowski, K. Grodzinska and B. Godzik, "Detecting ozone and demonstrating its phytotoxicity in forested areas of Poland – A pilot study", *Environ. Pollut.*, vol. 80, pp. 301-305, 1993.
- [16] O.J. Oller, "Empleo de bioindicadores para determinar la calidad del aire en la ciudad de Tarija en puntos de muestreo de red MoniCA", *Acta Nova*, vol. 8, no. 3, pp. 307-321, 2018.
- [17] A. Turkyilmaz, H. Sevik, K. Isinkaralar and M. Cetin, "Use of tree rings as a bioindicator to observe atmospheric heavy metal deposition", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 5, pp. 5122-5130, 2019.
- [18] C. Giovani, P.L. Nimis, G. Bolognini, R. Padovani and A. Usco, "Bryophytes as indicators of radiocesium deposition in north-eastern Italy", *Sci. Total Environ.*, vol. 157, pp. 35-43, 1994.
- [19] R. LijteRoff, L. Lima and B. PRieRi, "Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina", *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 25, no. 2, pp. 111-120, 2009.
- [20] R. Sett and M. Kundu, "Epiphytic lichens: their usefulness as bio-indicators of air pollution", *Donnish Journal of Research in Environmental Studies*, vol. 3, no. 3, pp. 17-24, 2016.
- [21] W. Nylander, "Les lichens du Jardin de Luxemburg", *Bull. Soc. Bot. Fr.*, vol. 13, pp. 364-372, 1866.
- [22] C.M. Van Herk, "Bark pH and susceptibility to toxic air pollutants as independent causes of changes in epiphytic lichen composition in space and time", *The lichenologist*, vol. 33, no. 5, pp. 419-442, 2001.
- [23] N. Panichev, N. Mokgalaka and S. Panicheva "Assessment of air pollution by mercury in South African provinces using lichens *Parmelia caperata* as bioindicators", *Environmental geochemistry and health*, vol. 41, no. 5, pp. 2239-2250, 2019.
- [24] I. Mares-Rueda, "Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire", Trabajo fin de grado, Facultad de farmacia, Universidad Complutense, 2017.
- [25] F. Leblanc and J. DeSloover, "Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal", *Canadian Journal of Botany*, vol. 48, no. 8, pp. 1485-1496, 1970.



María Lara Jiménez. Graduada en Bioquímica por la Universidad de Málaga tras cuatro años de angustiosos, aunque esclarecedores, estudios. Actualmente, se encuentra cursando el Máster en Biotecnología ambiental, industrial y alimentaria de la Universidad Pablo de Olavide, en el cual la asignatura Química Ambiental Avanzada la llevó a escribir su primer artículo.