

EL USO DE LÍQUENES COMO BIOMONITORES PARA EVALUAR EL ESTADO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA A NIVEL MUNDIAL

Víctor Hugo Méndez Estrada*
Julián Monge Nájera**

Recibido: 29-07-2011 Aceptado: 18-08-2011

RESUMEN

Los líquenes son frecuentemente utilizados como biomonitores (bioindicadores y bioacumuladores) para evaluar la calidad atmosférica, debido a su longevidad y porque obtienen la mayor parte de sus nutrientes del aire, lo que los hace muy sensibles a las impurezas presentes en el medio. Ellos se emplean como biomonitores cuando se realiza un mapeo de todas las especies presentes en un área específica o se estudian a lo largo del tiempo para comparar los resultados con valores promedio y por bioacumulación cuando se hace un muestreo de las especies liquénicas y se miden, por medio de análisis químicos, los contaminantes acumulados en sus talos. Tras revisar la última literatura publicada a nivel mundial, se concluye que el dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno son los principales contaminantes presentes en la atmósfera y ellos influyen en el crecimiento, distribución y salud de los líquenes. África y Oceanía son las regiones donde menos trabajos recientes existen en el campo.

PALABRAS CLAVE: • Bioindicación • Estudio global de líquenes • Bioindicador • Bioacumulación

ABSTRACT

Lichens are often used as bioindicators of air pollution due to their longevity and because they get most nutrients from the atmosphere; they are therefore very sensitive to impurities in the air. Lichens are used as bioindicators when mapping all species present in an area and in biomonitoring when making chemical analyses of contaminants accumulated in the thalli. After reviewing the recent world wide literature we conclude that sulfur dioxide and nitrogen dioxide are the main air pollutants that affect the growth, distribution and health of lichens, and that Africa and Oceania are the regions where less work has been done on lichen bioindication in recent years.

KEY WORDS: • Bioindication • Lichens Global study • Bioindicator • Bioaccumulation

Para la Organización Mundial de la Salud, el aire está contaminado cuando en su composición se encuentran una o varias sustancias extrañas, en cantidades y durante un período de tiempo que las convierte en nocivas para toda forma de vida en la Tierra: ser humano, los animales, las plantas, entre otros (Andrés *et al.*, 2000). Esta definición deja clara la importancia de cuidar el aire para la sobrevivencia de los

habitantes de este planeta. No obstante, en todo el mundo se siguen descargando en la atmósfera grandes cantidades de contaminantes que deterioran la calidad de los ambientes y ecosistemas de la Tierra. Conscientes de la importancia que representa contar con un aire puro para la sobrevivencia de los ecosistemas de la Tierra, muchos científicos a nivel

* Vicerrectoría de Investigación. Universidad Estatal a Distancia; vmendez@uned.ac.cr

** Vicerrectoría de Investigación. Universidad Estatal a Distancia; julianmonge@gmail.com

mundial emplean diversas técnicas para monitorear su calidad (García y Rubiano, 1984; Andrés *et al.*, 2000; Merwin y Nadkarni, 2001; Nali *et al.*, 2007; Joshi, 2008) y poder determinar así los niveles de las sustancias nocivas, como elementos y metales pesados (Al, As, B, Cd, Ca, Cr, Cu, Fe, Pb, Mg, Mn, Hg, Ni, P, K, Na, S y Zn) que alteran su calidad y composición (Dillman, 1996; Rhoades, 1999; Bernasconi *et al.*, 2000; Hawksworth *et al.*, 2005). También se recurre a muchos análisis estadísticos para interpretar y ordenar los resultados que indican la calidad de la atmósfera (Dillman, 1996; Cepeda y García, 1998; Rhoades, 1999; Vergara *et al.*, 2005; Domeño *et al.*, 2006; Vásquez *et al.*, 2006; Weissman *et al.*, 2006; Giordani, 2007; Nali *et al.*, 2007; Cristofolini *et al.*, 2008).

La mayoría de las investigaciones se han realizado en regiones templadas, donde se han identificado algunas especies como las más tolerantes a los contaminantes atmosféricos: *Lecanora conizaeoides*, *Scoliciosporum chlorococcum*, *Amandinea punctata* o *Phaeophyscia orbicularis*. Entre las más sensibles están *Lobaria pulmonaria*, *Lobaria amplissima* o especies pertenecientes a *Usnea*.

Las técnicas más comunes para monitorear la calidad del aire son las que emplean a los seres vivos como bioindicadores, pues a través de ellos se logra determinar la calidad de los ambientes terrestres y como bioacumuladores, al medir cuantitativamente la concentración de una sustancia. Los más usados son los musgos (Rhoades, 1999; Bedregal *et al.*, 2005; Monnet *et al.*, 2005; Ramírez y Cano, 2005), los líquenes (Cepeda y García, 1998; Rhoades, 1999; Monge *et al.*, 2002; Balmori, 2004; Hawksworth *et al.*, 2005; Monnet *et al.*, 2005; Ramírez y Cano, 2005; Vergara *et al.*, 2005; Fernández-Salegui *et al.*, 2002; Rubiano y Chaparro, 2006; Giordani, 2007; Policnik *et al.*, 2008) y otras plantas (Bedregal *et al.*, 2005; Monnet *et al.*, 2005; Gombert *et al.*, 2006; Nali *et al.*, 2007; Anze *et al.*, 2007).

La observación de los cambios en el comportamiento de los organismos bioindicadores, puede dar un

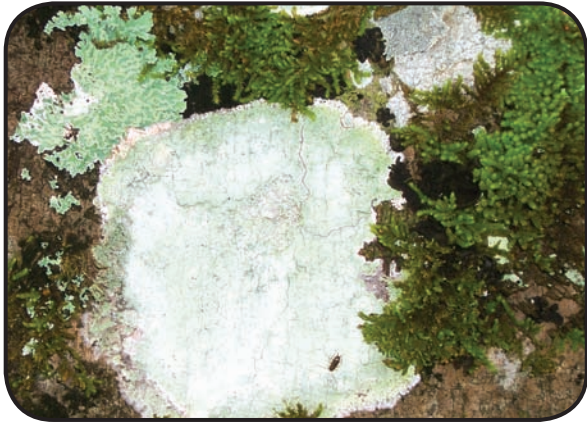
indicio de la calidad que presenta el medio en el que ellos se desarrollan (Nimis, s.f.; Cepeda y García, 1998; Rhoades, 1999; Ramírez y Cano, 2005; Fernández-Salegui *et al.*, 2002; Rubiano y Chaparro, 2006; Giordani, 2007; Policnik *et al.*, 2008). En varios países del mundo se han realizado estudios que utilizan a los líquenes como bioindicadores para valorar el estado de contaminación del aire de un área específica, pues ellos responden con cambios de su estado biológico ante ciertos niveles de contaminantes (Nimis, s.f.; Dillman, 1996; Bernasconi *et al.*, 2000; Asta *et al.*, 2002; Jeran *et al.*, 2002; Budka *et al.*, 2004; Bedregal *et al.*, 2005; Golubev *et al.*, 2005; Hawksworth *et al.*, 2005; Ramírez y Cano, 2005; Vergara *et al.*, 2005; Domeño *et al.*, 2006; Vásquez *et al.*, 2006; Aspiazu *et al.*, 2007; Giordani, 2007; Munzi *et al.*, 2007; Nali *et al.*, 2007; Cristofolini *et al.*, 2008; Fuga *et al.*, 2008; Policnik *et al.*, 2008; Lijteroff *et al.*, 2009) y en otros, se continúa con estudios en ese campo (Neurohr, 2010).

La pregunta que surge es: ¿por qué razón se emplean los líquenes como bioindicadores y bioacumuladores para determinar la calidad del aire? La respuesta se puede encontrar en su morfología y su fisiología.

Morfología y fisiología de los líquenes

Los líquenes son hongos liquenizados -reino Fungi- que pueden colonizar cualquier tipo de ambiente, desde altas montañas hasta desiertos (Ramírez y Cano, 2005; Santoni y Lijteroff, 2006; Fuga *et al.*, 2008). Consisten en una asociación mutualista entre un alga o cianobacteria (ficobionte) y un hongo (micobionte) (Kett *et al.*, s.f.; Rhoades, 1999; Bernasconi *et al.*, 2000; Hawksworth *et al.*, 2005; Ramírez y Cano, 2005; Domeño *et al.*, 2006; Lijteroff *et al.*, 2009). Constituyen un caso llamativo de hongo, pues no tiene raíces, flores ni hojas; toman el agua y los nutrientes directamente de la atmósfera y también los contaminantes allí presentes (Golubev *et al.*, 2005; Hawksworth *et al.*, 2005; Domeño *et al.*, 2006; Cristofolini *et al.*, 2008; Lijteroff *et al.*, 2009). La asociación entre ambos permite diferenciar varios tipos estructurales: desde el más simple (el hongo y el alga se asocian de forma casual) al más complejo (el micobionte y el fotobionte se organizan en un talo de morfología muy diferente al de los dos organismos constituyentes). En esta asociación el alga o cianobacteria se encuentra formando una capa bajo la protección del hongo (Coutiño y Montañéz, 2000). Entre los tipos estructurales está el crustáceo (en forma de costra), folioso (en forma





Las diversas especies de líquenes difieren en color y otros detalles, pero muchas veces solo pueden ser distinguidas por especialistas.

Fotografía de J. Monge-Nájera



- No poseen aparato excretor ni mecanismos de defensa, por lo tanto, son sensibles a los cambios ambientales (Vergara *et al.*, 2005).
- Son poiquilohidros, por lo que son capaces de concentrar y acumular en su talo distintos compuestos, como los contaminantes atmosféricos que se presentan en soluciones muy diluidas (Jeran *et al.*, 2002; Vergara *et al.*, 2005; Aspiazu *et al.*, 2007; Policnik *et al.*, 2008; Lijteroff *et al.*, 2009).

de hoja) y fruticoso o fruticuloso (diminuto arbusto) (Rhoades, 1999; Jeran *et al.*, 2002; Hawksworth *et al.*, 2005; Weissman *et al.*, 2006; Fuga *et al.*, 2008; Policnik *et al.*, 2008). Esta asociación simbiótica tiene su base ecológica en la toma de nutrientes por parte del alga que sule al hongo, este da el soporte a la estructura formada: el líquen.

Actualmente, se han identificado aproximadamente 40 géneros de algas y cianobacterias que actúan como fotobiontes en la simbiosis líquénica. Tres son los géneros más frecuentes, dos algas verdes: *Trebouxia*, *Trentepohlia* y una cianobacteria: *Nostoc*.

Los líquenes debido a su asociación mutualista son especies sensibles o resistentes ante los grados de contaminación atmosférica. Cuando la contaminación aumenta se produce un cambio de las especies sensibles que son sustituidas por especies tolerantes. Si el grado de contaminación es elevado entonces se produce el descenso o desaparición incluso de las especies tolerantes. Este comportamiento del líquen se debe a las siguientes características:

- Presencia de un talo perenne que carece de cutícula que lo cubra, esto hace que su superficie quede expuesta al aire y permita el paso libre de líquidos y gases durante toda su vida (Vergara *et al.*, 2005).
- Ausencia de una relación nutricional dependiente del sustrato o de sus elementos (Fuga *et al.*, 2008).
- Son muy estenoicos, es decir, sus requerimientos ecológicos son mínimos y precisos (Vergara *et al.*, 2005).

Por más de 140 años se han utilizado los líquenes como biomonitores de la contaminación atmosférica (Kett *et al.*, s.f.; Hawksworth *et al.*, 2005). Las líneas de investigación más frecuentes se pueden dividir en dos, de acuerdo con la metodología empleada (Domeño *et al.*, 2006): como bioindicadores (Cepeda y García, 1998; Asta *et al.*, 2002; Fernández-Salegui *et al.*, 2002; Jeran *et al.*, 2002; Balmori, 2004; Hawksworth *et al.*, 2005; Vergara *et al.*, 2005; Canseco *et al.*, 2006; Rubiano y Chaparro, 2006; Santoni y Lijteroff, 2006; Anze *et al.*, 2007; Aspiazu *et al.*, 2007; Giordani, 2007; Munzi *et al.*, 2007) y como bioacumulador (Dillman, 1996; Bernasconi *et al.*, 2006; Jeran *et al.*, 2002; Bedregal *et al.*, 2005; Golubev *et al.*, 2005; Domeño *et al.*, 2006; Gombert *et al.*, 2006; Santoni y Lijteroff, 2006; Vásquez *et al.*, 2006; Weissman *et al.*, 2006, Aspiazu *et al.*, 2007; Fuga *et al.*, 2008).

El método por bioindicador consiste en el mapeo o cartografía de todas las especies de líquenes presentes en un área específica que manifiestan síntomas particulares en respuesta a los cambios ambientales; en la práctica, lo que se mide son las respuestas indirectas a la emisión de contaminantes, que se manifiestan por la presencia o ausencia de las especies de líquenes, su número, la frecuencia de aparición, la cobertura y los síntomas de daños externos o internos, sin determinar el origen o tipo de contaminante (Jeran *et al.*, 2002; Rubiano y Chaparro, 2006).

El método por bioacumulación está basado en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los



Algunos líquenes de zonas frías, como estos del Cerro de la Muerte en Costa Rica, forman estructuras elevadas denominadas “de tipo arborescente” que pueden confundirse con plantas comunes.

Fotografía de J. Monge-Nájera.

líquenes cuando acumulan sustancias particulares dentro de sus tejidos, cuyas concentraciones se determinan mediante métodos químicos. Consiste en el muestreo individual de las especies líquénicas y la medición de los contaminantes acumulados en sus talos (Jeran *et al.*, 2002; Hawksworth *et al.*, 2005; Santoni y Lijteroff, 2006).

Las razones anteriores son las que se han considerado para emplear y seguir utilizando los líquenes como monitores de la calidad del aire en todo el mundo.

Con base en lo señalado en los párrafos anteriores se plantean los siguientes objetivos:

- Evidenciar, por medio de la literatura, el potencial que tienen los líquenes como monitores de la contaminación atmosférica a nivel mundial.
- Mapear, mediante un sistema de información geográfica, la distribución mundial de los estudios de contaminación ambiental que emplean a los líquenes como bioindicadores y bioacumuladores.

Para poder dar respuesta a los objetivos se plantea la siguiente interrogante: ¿cómo emplean los científicos a los líquenes para determinar la calidad del aire?

Los líquenes han sido empleados en numerosos estudios como biomonitores que buscan conocer la

calidad del ambiente de la Tierra; ellos han sido utilizados para:

- Determinar la calidad de la atmósfera, dado que reaccionan ante los cambios producidos por la lluvia ácida (Nimis, s.f.; Fernández-Salegui *et al.*, 2002; Hawksworth *et al.*, 2005; Vergara *et al.*, 2005; Rubiano y Chaparro, 2006; Santoni y Lijteroff, 2006; Anze *et al.*, 2007; Policnik *et al.*, 2008; Lijteroff *et al.*, 2009). La eutrofización por amonio (Hawksworth *et al.*, 2005), hidrocarburos clorinados (Domeño *et al.*, 2006), la contaminación por metales pesados (Dillman, 1996; Bernasconi *et al.*, 2000; Bedregal *et al.*, 2005; Golubev *et al.*, 2005; Rubiano y Chaparro, 2006; Vásquez *et al.*, 2006; Weissman *et al.*, 2006; Aspiazu *et al.*, 2007; Giordani, 2007; Fuga *et al.*; 2008); los derrames de hidrocarburos, la contaminación por dióxido de azufre (Fernández-Salegui *et al.*, 2002; Hawksworth *et al.*, 2005; Vergara *et al.*, 2005; Rubiano y Chaparro, 2006; Santoni y Lijteroff, 2006; Anze *et al.*, 2007; Policnik *et al.*, 2008; Rojas-Fernández *et al.*, 2008; Lijteroff *et al.*, 2009) y material radioactivo, radionucleidos (Cepeda y García, 1998; Rhoades, 1999; Coutiño y Montañéz, 2000; Golubev *et al.*, 2005; Rubiano y Chaparro, 2006).
- Determinar los cambios climáticos: radiación ultravioleta (Hawksworth *et al.*, 2005; Rojas-Fernández *et al.*, 2008).
- Conocer la continuidad ecológica: bosques deciduos (bosque que pierde totalmente su follaje durante una parte del año), bosques de coníferas, fuego y estabilidad de superficies (Hawksworth *et al.*, 2005).

A continuación se analiza el cómo los científicos se basan en las densidades poblacionales de los líquenes para valorar la calidad de los ambientes terrestres.

Los líquenes como biomonitores de la calidad de la atmósfera

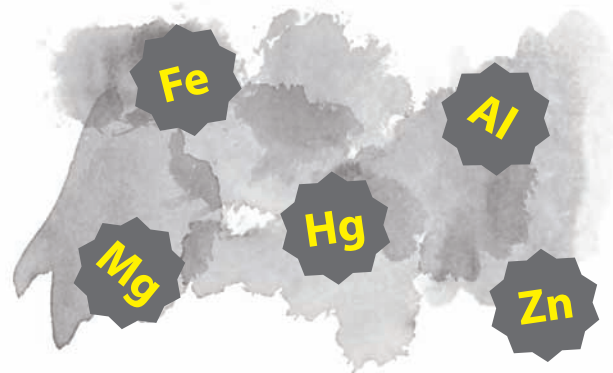
Al ser empleados como bioacumuladores para medir el estado de la atmósfera, los científicos recurren a la fisiología de los líquenes, dado que acumulan metales pesados que toman de la atmósfera, esto se debe a su capacidad de acumularlos en los espacios intercelulares y al intercambio catiónico: la carga negativa de los constituyentes de sus paredes celulares establecen enlaces iónicos con los elementos catiónicos solubles del aire (Bedregal *et al.*, 2005).

Son muchos los metales que se han estudiado en las células de los líquenes: Al, As, B, Cd, Ca, Cr, Cu, Fe,

Pb, Mg, Mn, Hg, Ni, P, K, Na, S y Zn (Dillman, 1996; Bernasconi *et al.*, 2000; Bedregal *et al.*, 2005; Golubev *et al.*, 2005; Rubiano y Chaparro, 2006; Vázquez *et al.*, 2006; Weissman *et al.*, 2006; Aspiazu *et al.*, 2007; Giordani, 2007; Fuga *et al.*, 2008).

Los metales llegan hasta los líquenes a través de varias fuentes, el As (arsénico) proviene de la actividad minera e industrial, el V (vanadio) se debe a la emisión de gases producto de la combustión del petróleo por los vehículos pesados. El Al (aluminio) es el resultado de la fabricación industrial de utensilios, envases, materiales de construcción y pinturas. El Pb (plomo) resulta de la combustión vehicular de los derivados del petróleo (Hawksworth *et al.*, 2005). El U (uranio) es debido a emisiones radioactivas (Golubev *et al.*, 2005). El Co (cobalto) es emitido por la industria metalúrgica; mientras que las concentraciones de Mn (manganeso) y Zn (zinc) pueden estar relacionadas principalmente con las emisiones industriales como las del acero (Bernasconi *et al.*, 2000), el Zn también puede ser liberado al ambiente por el desgaste de los motores de vehículos, la abrasión de los neumáticos (Bernasconi *et al.*, 2000) y la quema de neumáticos viejos (Fuga *et al.*, 2008). El Cd (cadmio) es liberado por el desgaste normal sufrido por los neumáticos y por la industria del acero (Jeran *et al.*, 2002).

Los compuestos de NO_x (óxidos de nitrógeno) son más altos en las zonas cercanas a las fábricas de



cemento y plantas químicas (Weissman *et al.*, 2006). Los compuestos de SO_x, CO y CO₂ proceden de la combustión del carbón y del petróleo, de la industria metalmeccánica, de la combustión vehicular (Cepeda y García, 1998) y de otras industrias como las plantas de energía térmica que emiten SO₂ a la atmósfera (Policnik *et al.* 2008). Los procesos de combustión del tráfico vehicular, el sector industrial y la calefacción del hogar son los principales responsables de la generación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (Domeño *et al.*, 2006).

Los contaminantes más comunes dentro de las ciudades son el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el ozono, las partículas en suspensión, los metales pesados y los compuestos químicos orgánicos como el benceno y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (Anze *et al.*, 2007).

El aumento en la atmósfera de NO_x, SO_x y CO₂, contribuye a que el pH natural de la lluvia (entre 5 y 5,7) sea menor a 5. Esto se debe a que el contenido de dióxido de carbono (CO₂), al entrar en contacto con la humedad atmosférica, forma ácido carbónico y hace el pH más ácido, situación que afecta a la densidad de líquenes (Kett *et al.*, s.f.). El SO₂ presente en la lluvia ácida o en la atmósfera produce daños directos e indirectos cuando es absorbido por los líquenes, además también se acumulan altos niveles de sulfatos y bisulfatos en sus tejidos, los cuales producen serios daños al liquen: los incapacitan para realizar la fotosíntesis, debido a que daña la clorofila; decoloración de los talos y separación de estos del sustrato, que será mayor entre más cerca se ubiquen de la fuente de contaminación; respiración celular, en algunos casos se interrumpe la fijación de nitrógeno y la transferencia de carbohidratos y nutrientes del alga (o cianobacteria) al hongo (Nimis, s.f.; Kett *et al.*, s.f.; Canseco *et al.*, 2006), lo que ocasiona la deformación de la estructura del talo y eventualmente causa la muerte (Lijteroff *et al.*, 2009).



Las estructuras reproductivas de algunos líquenes son de colores llamativos. Los líquenes tienen reproducción asexual y sexual y son dispersados principalmente por el viento.

Fotografía de J. Monge-Nájera

El dióxido de azufre es además uno de los componentes principales de la lluvia ácida, la cual produce que la corteza de los árboles sea menos propicia para el crecimiento de los líquenes. A medida que aumenta la concentración de dióxido de azufre, disminuye la abundancia de líquenes. Sin embargo, las poblaciones de líquenes no desaparecen por completo:

Los efectos fisiológicos sobre el líquen al exponerlo a óxidos de nitrógeno son similares a los de exposición a dióxidos de azufre, ya que un nivel anual de 564 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o mayor de óxidos de nitrógeno puede resultar en la decoloración, deformación y en la muerte del líquen (Froehlich, 2006, p. 113).

Sin embargo, las poblaciones de líquenes no desaparecen por completo dado que las especies tienen diferentes niveles de tolerancia a los contaminantes. Algunas pueden sobrevivir en ambientes que están contaminados en forma severa, mientras que otros perecen si las condiciones no son las óptimas (Gombert *et al.*, 2006).

Los estudios demuestran que existe, por lo general, una buena correlación entre la diversidad de los líquenes y la concentración de contaminantes, principalmente SO_2 y CO (Giordani, 2007); sin embargo, existe suficiente información sobre la bioindicación



A menudo los líquenes crecen junto a otros tipos de organismos que colonizan los troncos, tomando ventaja de la mayor luminosidad que hay en partes altas del ecosistema.

Fotografía de J. Monge-Nájera.



de los líquenes en casos concretos de contaminación por SO_2 , CO y NO_2 (Fuentes y Rawe, 1998; Giordani, 2007).

Los cambios climáticos monitoreados por medio de los líquenes

El clima es un factor que influye en la diversidad de líquenes, al igual que la acidez de los forófitos -plantas sustrato- (Lijteroff *et al.*, 2009); razón por la cual los líquenes son empleados para estudiar el cambio climático presente en la Tierra, causado por el deshielo polar y las quemadas de bosques.

Los líquenes se han empleado en los estudios que investigan el deshielo en las áreas polares (la Antártida y el Ártico), dado que cuando el hielo retrocede, los líquenes colonizan las zonas que han quedado descubiertas (Fernández, 2007 p. 1): áreas rocosas cubierta por líquenes saxícolas o rupícolas. También son útiles para determinar la actividad del fuego en un bosque, pues después de un incendio no se recupera con facilidad la composición de flora y comunidades líquénicas existentes antes del incendio. La sucesión de recolonización de las especies de líquenes es un bioindicador de recuperación de los bosque incendiados (Hawksworth *et al.*, 2005). Giordani (2007), que ha investigado la influencia significativa de predictores climáticos y factores de perturbación en líquenes epífitos, llegó a la conclusión de que su distribución depende tanto del sustrato y del ambiente como de otros factores relacionados.

La continuidad ecológica y su relación con la diversidad de líquenes

Uno de los indicadores de las diferentes condiciones en los bosques y espacios abiertos es la abundancia y diversidad de especies, ya que su composición y riqueza a menudo se utilizan para el análisis espacial en ecosistemas (Policnik *et al.*, 2008). La aplicación generalizada y más importante de uso de los líquenes como bioindicadores en los trópicos está relacionada con las perturbaciones ocurridas en los bosques (Hawksworth *et al.*, 2005).



Como las colonias se desarrollan alrededor de una espora o de un trozo desprendido de otro líquen, suelen tener forma redondeada.

Fotografía de los autores.

Dado que la distribución de líquenes epífitos depende del sustrato, del ambiente y de factores relacionados, se esperan entonces diferencias en la riqueza de especies entre los sitios de bosques y zonas abiertas (Giordani, 2007).

El mayor potencial de utilizar líquenes como bioindicadores en los trópicos, es en relación con las perturbaciones en los bosques. Se ha demostrado que ciertas especies no pueden dispersarse de un árbol a otro más allá de distancias críticas y por esto pueden utilizarse como indicadores de la edad de un bosque. En Tailandia, la separación en el ámbito de familia de los líquenes es suficiente para indicar si un bosque ha sido afectado por el fuego (Hawksworth *et al.*, 2005). También, a través de ellos se determina la continuidad ecológica: la presencia de *Letroitia vulpina* se relaciona con los bosques lluviosos no alterados por el fuego. Algunas especies del género *Badimia* mostraron correlación con los bosques menos perturbados en Costa Rica, por lo que se recomienda su estudio para identificar lugares con una alta biodiversidad y por ende, con un valor particular en cuanto a su conservación (Hawksworth *et al.*, 2005).

Además se estudió la presencia de líquenes en comunidades de manglares al sur de la India que habían sido sometidos a diversos grados de perturbación;

se encontró que especies de *Pyrenula* estaban restringidas a lugares no perturbados, mientras que las especies *Dirinaria* y *Roccella* se encontraron en áreas perturbadas (Hawksworth *et al.*, 2005). En Tailandia se estudiaron líquenes en árboles de gran altura y su presencia sobre el tronco es indicador de la antigüedad del bosque; también, la diversidad de especies sobre las hojas puede ayudar a determinar si selvas tropicales con presencia de árboles muy altos se encuentran en bosques primarios o secundarios (Hawksworth *et al.*, 2005).

Los distintos estudios que emplean a los líquenes como bioindicadores llegan a concluir que en el trópico se debe prestar especial atención a la destrucción de los bosques y a los cambios en el régimen de uso de la tierra (Hawksworth *et al.*, 2005).

Resultados de los estudios a nivel mundial que emplean los líquenes como bioindicadores y bioacumuladores

Para poder contar con información suficiente para elaborar el mapa mundial que muestra la importancia del uso de los líquenes para determinar la calidad del aire, se realiza una descripción de algunos estudios donde se emplean los líquenes como bioindicadores y bioacumuladores de los contaminantes atmosféricos (Cuadro 1).

La información anterior permite generar un mapa mundial (Figura 1) que muestra cuáles países han utilizado los líquenes para monitorear la calidad del aire.

Cuando se muestran los resultados del uso de los líquenes como biomonitores de la contaminación atmosférica surge una pregunta importante para muchos: ¿Cómo la presencia o ausencia de líquenes en los ecosistemas se relaciona con enfermedades presentes en los seres humanos? Cislighi y Nimis (1997) concluyen que existe una fuerte relación entre la contaminación atmosférica y el cáncer de pulmón.

Trataremos de responder a esta interrogante con la información suministrada en otros estudios (Cuadro 2).



CUADRO 1

Resultados de los estudios a nivel mundial que emplean los líquenes como bioindicadores y bioacumuladores de los contaminantes del aire.

Año e investigador	Contaminante estudiado en los líquenes	Lugar del estudio	Fuente de emisión del contaminante	Resultados importantes
2009				
Lijteroff <i>et al.</i>	SO ₂	San Luis y Juana Koslay, Argentina	Emitido por la combustión interna del tráfico vehicular	Hay mayor número de especies, Índice de Pureza Atmosférica (IPA) mayor; altos valores de riqueza, diversidad y equitatividad en el área no contaminada.
2008				
Cristofolini <i>et al.</i>	SO _x , NO _x y NH ₃	Valle Prealps (Trentino, norte de Italia)	Fábrica de cemento y carretera urbana extra	Efecto sinérgico negativo por alta correlación entre el SO ₂ y NO _x .
Fuga <i>et al.</i>	As, Ba, Br, Ca, Cl, Cr, Cs, Co, K, Fe, La, Mn, Mo, Na, Rb, Sb, Sc, Se, U, Zn	Región metropolitana, Sao Paulo, Brasil	2000 industrias y 7,84 millones de vehículos	La acumulación de elementos tóxicos en <i>Canoparmelia texana</i> pueden ser de utilidad para determinar el riesgo humano de mortalidad cardiopulmonar
Policnik <i>et al.</i>	SO ₂	Valle Salek, Eslovenia	Planta de energía térmica de Sostanj	Líquenes más escasos en bosques que en espacios abiertos, dado que las concentraciones de sulfuro y compuestos de nitrógeno en las precipitaciones son más altas en bosques de la ciudad de Zavodnje que en las áreas abiertas.
Rojas-Fernández <i>et al.</i>	Radiación ultravioleta	Sierra Nevada de Mérida, Venezuela	Radiación ultravioleta	55% de las especies presentan resistencia en el ámbito UVC, 95% en el ámbito del espectro UVB y 100% mostraron resistencia en el ámbito UVA del espectro.
2007				
Anze <i>et al.</i>	SO ₂ y O ₃	La Paz y El Alto, Bolivia	Tráfico vehicular y quema de basura a cielo abierto	La distribución y cobertura de los líquenes y el IPA parecen responder a tres factores: contaminación atmosférica por el tráfico vehicular y otras fuentes de emisión, dispersión de los contaminantes por brisas de viento en plazas y avenidas anchas y la extensión de las áreas con vegetación.

CUADRO 1 (Continuación...)

Resultados de los estudios a nivel mundial que empujan los líquenes como bioindicadores y bioacumuladores de los contaminantes del aire.

Año e investigador	Contaminante estudiado en los líquenes	Lugar del estudio	Fuente de emisión del contaminante	Resultados importantes
Aspiazu <i>et al.</i>	Óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, monóxido de carbono, metales pesados: Ti, V, Cr, Co, Ni, Mn, Cu y Zn	Valle Metropolitano de México	30 000 industrias: químicas, silúrgicas, fundiciones de hierro, textiles, minería, papel, plásticos, nutrición, asfalto, aceites, cemento, petroquímica y alrededor de tres millones de automóviles	En época seca la deposición de Ti, Mn, Cu y Zn es uniforme. En todos los lugares: su concentración en líquenes varía poco. En época lluviosa el Ti, V, Cr, Co y Ni mantienen una deposición constante.
Fernández	Efecto del cambio climático	Ártico y Antártida	Cambio climático	Los líquenes son los primeros en colonizar las rocas dejadas al descubierto por el deshielo.
Giordani	SO ₂ y NO _x	Génova, Italia	Industrias y tráfico vehicular	En el área contaminada, la diversidad del líquen es sensible a la carga total de SO ₂ > 8 toneladas/año. Se nota un menor efecto cuando se reducen las emisiones de los contaminantes.
Munzi <i>et al.</i>	CO, NO _x y SO ₂	Roma, Italia	Influencia del mar Tirreno	Los vientos son un factor importante que afecta el ambiente urbano de Roma. La diversidad de líquenes disminuye cuando hay mayores concentraciones de CO, NO _x y SO ₂ en la atmósfera.
Nali <i>et al.</i>	O ₃	Castelfiorentino, Toscana, Italia	Industrias y flota vehicular	La cartografía de la biodiversidad de líquenes epífitos no estaba relacionada con la distribución geográfica de la capa de ozono.
2006				
Canseco <i>et al.</i>	Combustión vehicular	La Paz, Bolivia	Tráfico vehicular	En las áreas de alta intensidad vehicular más contaminadas, existe menor diversidad de líquenes; valores bajos de presencia y cobertura.
Domeño <i>et al.</i>	16 hidrocarburos aromáticos policíclicos	Área cercana al Río Gallego, Zaragoza, España	Combustión del diesel, gasolina y gas natural por vehículos, sector industrial y por la calefacción del hogar	Se demuestra que los líquenes son buenos indicadores de la calidad del aire y que permiten evidenciar la presencia y concentración de hidrocarburos.

CUADRO 1 (Continuación...)

Resultados de los estudios a nivel mundial que emplean los líquenes como bioindicadores y bioacumuladores de los contaminantes del aire.

Año e investigador	Contaminante estudiado en los líquenes	Lugar del estudio	Fuente de emisión del contaminante	Resultados importantes
Fernández-Salegui <i>et al.</i>	SO ₂	La Robla, León, España	Central térmica	Se hace una comparación con datos de 1994 y se advierte que no han existido grandes cambios en la diversidad líquénica, pese a que se observa un ligero aumento en las inmisiones de SO ₂ . Se percibe un incremento de especies de líquenes toxitolerantes.
Gomber <i>et al.</i>	Ozono, NO ₂	Grenoble, los Alpes del Norte, sureste de Francia	Tráfico vehicular e industrias de cemento y planta química	Los niveles más altos de NO ₂ se presentan en las zonas más contaminadas. No hay correlación entre los valores de IPA y las concentraciones de O ₃ y NO ₂ .
Rubiano y Chaparro	SO _x , NO _x , CO, CO ₂	Universidad Nacional de Bogotá, sede Colombia	Combustión del carbón y del petróleo de la industria metalmeccánica y de otras industrias	La contaminación en el perímetro del área universitaria guarda estrecha relación con la ausencia de barreras vivas o setos arbóreos en dicho perímetro.
Santoni y Lijteroff	SO _x y NO _x	Juana Koslay, San Luis, Argentina	Combustión de hornos que queman leña y combustible para la cocción de ladrillos	No existen diferencias significativas entre la cobertura de líquenes y la calidad del aire en el área contaminada y las dos áreas no contaminadas.
Vásquez <i>et al.</i>	SO ₂	Gran Canaria, España	Actividad industrial y tráfico vehicular	Las estaciones con mayor bioacumulación de azufre en los líquenes se localizan en zona más costeras cerca de núcleos con mayor influencia industrial y con altitudes entre los 300 y 500 metros, con vientos dominantes de dirección noreste (alisios).
Weissman <i>et al.</i>	Antioxidantes hidrocarburos, óxidos de azufre y nitrógeno (SO _x y NO _x) y ozono	Hazorea, noreste de Israel y Bahía de Haifa	Refinerías de petróleo; plantas de energía química y petroquímica y empresa electroquímica	El estrés oxidativo es consecuencia de la contaminación del aire y es más grave cerca de las refinerías de petróleo que en los alrededores de la planta electroquímica.

CUADRO 1 (Continuación...)

Resultados de los estudios a nivel mundial que empujan los líquenes como bioindicadores y bioacumuladores de los contaminantes del aire.

Año e investigador	Contaminante estudiado en los líquenes	Lugar del estudio	Fuente de emisión del contaminante	Resultados importantes
2005				
Bedregal <i>et al.</i>	Metales pesados: Al, Ca, Cl, V, Mg, Mn, Na, Ti, As, Br, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Fe, Hf, Hg, K, La, Rb, Sb, Sc, Sn, Th, Zn	Lima, Perú	Tráfico vehicular, minería, industrias: utensilios, envases, materiales de construcción y pinturas	Existe correlación significativa entre la presencia de Pb y Br de acuerdo con la actividad antropogénica del sitio estudiado.
Golubev <i>et al.</i>	Radionucleidos, en particular uranio	Región central de Rusia	Radiación nuclear	El contenido de uranio en la atmósfera no excede los 0,075 mg/m ³ , valor considerado como estándar para el conjunto natural de U.
Hawksworth <i>et al.</i>	Dióxido de azufre, fluoruros, ozono, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono	Artículo de revisión	Contaminantes gaseosos que emanan los automóviles por combustión	
Monnet <i>et al.</i>	Cobre	Francia		
Vergara <i>et al.</i>	Hollín, SO ₂ y metales pesados: Pb, Cd	Islas Galápagos: Santa Cruz	Quema en botaderos de basura a cielo abierto	Los sitios muy cercanos a la zona de quema reciben todo el humo; en ellos la cobertura de líquenes es muy baja inclusive llega a 0%.
2004				
Budka	Metales pesados: P, S, Cl, K, Ca, Mn, Fe y Zn	Cracovia, sur de Polonia		En la parte superior de los talos o en los fragmentos heridos se da el mayor contacto con los contaminantes atmosféricos.
2002				
Jeran <i>et al.</i>	SO ₂ y Metales pesados: As, Ba, Br, Ca, K, Cd, Ce, Co, U, Cr, Cs, Fe, W, Ga, Hf, Hg, La, Mo, Na, P, Rb, Sb, Sc, Se, Sm, Sr, Pb, Th y Zn	República de Eslovenia	Industria del acero, red vial, plantas de carbón	

CUADRO 1 (Continuación...)

Resultados de los estudios a nivel mundial que emplean los líquenes como bioindicadores y bioacumuladores de los contaminantes del aire.

Año e investigador	Contaminante estudiado en los líquenes	Lugar del estudio	Fuente de emisión del contaminante	Resultados importantes
Fernández-Salegui <i>et al.</i>	SO ₂ y óxidos de nitrógeno (NO _x)	León, Asturias y Palencia	Centrales térmicas: Anllares, Compostilla, La Robla, Narcea, Lada, Soto de Ribera y Guardo	Muestras de líquenes trasplantadas en zonas aledañas a las centrales térmicas no sobreviven más de 15 ó 16 semanas.
Monge-Nájera <i>et al.</i>	CO ₂ , NO ₂	San José, Costa Rica	Tráfico vehicular	Hubo un deterioro en la cobertura de los líquenes después de 1976 y una mejora a partir de 1986, al disminuir la cantidad de plomo en la gasolina y mejorarse los patrones de tránsito.
2000				
Andrés <i>et al.</i>	CO, SO ₂ , NO _x	Rosario, Argentina	Tráfico vehicular	Se observan bajas concentraciones de estos contaminantes en zonas suburbanas y altas concentraciones en zonas cercanas a la mayor actividad comercial. Las concentraciones de los contaminantes tienden a disminuir durante el fin de semana debido a la poca circulación de vehículos.
Bernasconi <i>et al.</i>	Metales pesados: Ni, Cr, Cu, Cd, Zn y Pb	Microcentro de San Luis, Argentina	Tráfico vehicular, abrasión de neumáticos e industrias	Se encuentran altas concentraciones de Zn en algunas zonas. La concentración de metales pesados en líquenes es diferente, debido a los cambios de humedad que ocurren en las cuatro estaciones del año.
1998				
Cepeda y García	SO ₂ , NO ₂	Sevilla, España	Tráfico vehicular	Zonas residenciales con alto tráfico vehicular presentan menor cantidad de cobertura de líquenes.
1996				
Dillman	Metales: Cd, Cr, Zn, Ni, Fe, Al, Na, Pb, B, Mn, K, Mg, Ca, P, Cu	Noreste de Pocatello Idaho, EE.UU.	Refinería de fosfato	La concentración de Cd, Cr, Zn, Pb, B, Mn, K, Mg, Ca, P, Cu en el líquen presenta diferencias significativas en relación con la distancia y dirección de la refinería.

FUENTE: Elaboración de los autores con base en las referencias bibliográficas consultadas.

CUADRO 2
Fuentes de contaminación de los metales encontrados en la atmósfera
y sus efectos en el ser humano (WHO, 2003).

Contaminante	Fuente que lo origina	Efectos en la calidad de vida del ser humano
Aluminio (Al)	Combustión vehicular, polvo en las carreteras; fábricas de cemento e incineradoras de residuos.	Apatía, daño del sistema nervioso central.
Arsénico (As)	Combustión de carbón, minería, industria del vidrio, plaguicidas, preservantes para madera, fundidoras de metales (cobre, níquel y cromo).	Irritación del estómago e intestinos, disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, cambios en la piel, e irritación de los pulmones.
Boro (Br)	Suelos volcánicos asociados con manantiales, escapes de vehículos	
Cadmio (Cd)	Galvanoplastia, aleaciones de rodamiento vehicular, combustión de combustibles fósiles, capas superficiales del océano, erupciones volcánicas y emisiones producto de la incineración de baterías de níquel-cadmio.	Mutagénico y cancerígeno.
Calcio (Ca)	Piedra caliza, caminos sin pavimentar y niebla salina.	Afecta el sistema circulatorio.
Cromo (Cr)	Fabricación de aleaciones de acero, catalizadores, galvanoplastia, fabricación de pigmentos, curtido de cuero, conservantes de madera, subproducto de la combustión de carbón.	Erupciones cutáneas, malestar de estómago y úlceras, problemas respiratorios, cáncer de pulmón.
Cobre (Cu)	Fundiciones y zonas donde se extrae el cobre, influencia marina, fungicidas con cobre, escape de los vehículos.	Irritación de nariz, boca, ojos y dolores de cabeza, mareo, náusea y diarrea.
Flúor (F)	Liberado en forma de fluoruro por la fundición de aluminio, la fabricación de vidrio, la producción de fertilizantes y algunas erupciones volcánicas.	Anomalías inmunológicas, enfermedades respiratorias y de pulmón.
Hierro (Fe)	Minas de explotación de oro, actividades antropogénicas: abrasión de los metales de los motores de automóviles, minería y fundición de hierro, cenizas de la combustión de carbón.	Daño de tejido cardíaco, aumento de los radicales libres, daño del sistema inmunológico.
Plomo (Pb)	Zonas mineras y diversas áreas industriales, emisiones de vehículos.	Perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia, incremento de la presión sanguínea, daño a los riñones y perturbación del sistema nervioso.
Manganeso (Mn)	Orillas de la playa, aleaciones de acero, polvo de abrasión de los motores de auto.	Daño pulmonar y bronquitis.
Mercurio (Hg)	Industrias procesadoras de mercurio.	Daño al sistema nervioso, daño a las funciones del cerebro y reacciones alérgicas, irritación de la piel, cansancio y dolor de cabeza.
Níquel (Ni)	Fabricación de aleaciones de acero duro, galvanoplastia, humos procedentes del petróleo, plantas que queman carbón térmico, incineradoras de residuos municipales.	Elevadas probabilidades de desarrollar cáncer de pulmón, nariz, laringe y próstata, fallos respiratorios.



FIGURA 1. Mapa mundial en que se ubican los países que han realizado estudios con líquenes como bioindicadores o como bioacumuladores de contaminantes presentes en el aire.

CONCLUSIONES

Los líquenes son un tipo particular de hongos (reino Fungi) que se usan para monitorear la calidad del aire, ellos no miden la contaminación atmosférica, lo que hacen es reaccionar frente a los contaminantes presentes en su medio; por lo tanto, informan de la desviación respecto a las condiciones de normalidad que deben existir en sus ecosistemas para su óptimo desarrollo.

Son muchos los estudios realizados a nivel mundial que emplean los líquenes para biomonitorear la calidad del aire, utilizándolos como bioindicadores cuando manifiestan síntomas particulares como respuesta a los cambios ambientales o como bioacumuladores cuando por medio de ellos, se logran medir químicamente las sustancias acumuladas en sus tejidos. Su uso tan generalizado se debe a que su estructura está formada por un alga y un hongo que le confieren al líquen características particulares: mayor longevidad, todos los nutrientes los obtienen de la atmósfera y presentan requerimientos mínimos para sobrevivir.





Los líquenes son empleados para conocer la calidad del ambiente terrestre; por medio de ellos se puede:

- a. Establecer la calidad de la atmósfera, dado que reaccionan ante los cambios producidos por la lluvia ácida.
- b. Determinar los cambios climáticos producto de la radiación ultravioleta.
- c. Conocer la continuidad ecológica en bosques deciduos y en bosques de coníferas.

La calidad del aire se puede medir mediante los síntomas y daños que se evidencian en los líquenes, manifiestas por medio de las reacciones morfofisiológicas en los individuos y poblaciones, como son la disminución de la cobertura o de la producción de propágulos o en forma de reacciones ecológicas en las comunidades líquénicas, entre ellas, cambios de distribución espacial y de patrones de diversidad.

Concentraciones distintas de SO_2 (dióxido de azufre) en la atmósfera provocan en las especies de líquenes diversos daños al reducir:

- La actividad fotosintética al dañar la clorofila.
- La viabilidad y cambios en la forma y el color de los talos.
- La fecundidad.
- Las especies resistentes a la contaminación, dado que repelen más las gotas de agua, lo que limita la absorción de sustancias disueltas en ellos.
- El número total de especies por área según el tiempo de exposición a los contaminantes.

En la mayoría de los estudios se ha demostrado que la desaparición de líquenes se debe a la contaminación producida por el dióxido de azufre y por el dióxido de nitrógeno.



No todos los troncos tienen líquenes, y a menudo los líquenes solo crecen en ciertas partes de un tronco, resultado de muchos factores que incluyen la luz y la humedad.

Fotografía de J. Monge-Nájera.

REFERENCIAS

- Andrés, D., Ferrero, E. y Mackler, C. (2000). Monitoreo de contaminantes del aire en la ciudad de Rosario. Recuperado de http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/investigacion/gese/publicaciones/gese_facchile.pdf
- Anze, R., Franken, M., Zaballa, M., Pinto, M., Zeballos, G., Cuadros, M. Á., Canseco, Á., De la Rocha, A., Estellano, V.H. y Del Granado, S. (2007). Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia. *Revista Virtual REDESMA*, 1, 54-74.
- Aspiazu, J. L., Cervantes, J., Ramírez, J., López, R., Ramos, R., Muñoz, P. & Villaseñor, P. (2007). Temporal and spatial trends studied by lichen analysis: atmospheric deposition of trace elements in Mexico. *Revista Mexicana de Física*, 53, 87-96.
- Asta, J., Erhardt, W., Ferretti, M., Fornasier, F., Kirschbaum, U., Nimis, P. L., Purvis, O. W., Pirintsos, S., Scheidegger, C., Van Haluwyn, C. & Wirth, V. (2002). *Mapping lichen diversity as an indicator of environmental quality*. In *Monitoring with Lichens - Monitoring Lichens*. Nimis, P. L., Scheidegger, C. and Wolseley, P. A. (Eds.). (273-279). Netherlands, Kluwer: Academic Publishers.
- Balmori, A. (2004). Posibles efectos de las ondas electromagnéticas utilizadas en la telefonía inalámbrica sobre los seres vivos. *Ardeola*, 51, 477-490.

- Bedregal, P., Torres, B.; Mendoza, P., Ubillús, M., Hurtado, J., Maza, I. y Espinoza, R. (2005). *Uso de Usnea sp. y Tillandsia capillaris, como bioindicadores de la contaminación ambiental en la ciudad de Lima, Perú*. Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN). Informe científico y tecnológico. 151-156.
- Bernasconi, E., De Venito, I.E., Martínez, L. D. y RABA, J. (2000). Liqueen *Usnea densirostra* como bioindicador de metales pesados. Determinación por ICP-AES acoplado con nebulizador ultrasónico. *Ars Pharmaceutica*, 41, 249-257.
- Budka, B., Mesjasz-Przybylowicz, J. & Przybylowicz, W. (2004). Environmental pollution monitoring using lichens as bioindicators: a micro-PIXE study. *Radiation Physics and Chemistry*, 71, 783-784.
- Canseco, A., Anze, R. & Franken, M. (2006). Comunidades de líquenes: indicadores de la calidad del aire en la ciudad de La Paz, Bolivia. *ACTA NOVA* 3, 286- 307. Recuperado de <http://www.ucbcba.edu.bo/Publicaciones/actanova/documentos/v3n2/v3.n2.Canseco.pdf>
- Cepeda, J. & García, J. (1998). The effect of air pollution from nitrogen dioxide (NO₂) on epiphytic lichens in Seville, Spain. *Aerobiología*, 14, 241-247.
- Cislaghi, C. & Nimis, P. L. (1997). Lichens, air pollution and lung cancer. *Nature*, 387(6632), 463-464.
- Coutiño, B. y Montañez, A. L. (2000). Los líquenes. *Ciencias*, 59, 64-65.
- Cristofolini, F., Giordani, P., Gottardini, E. & Modenesi, P. (2008). The response of epiphytic lichens to air pollution and subsets of ecological predictors: A case study from the Italian Prealps. *Environmental Pollution*, 151, 308-317.
- Dillman, K. (1996). Use of the lichen *Rhizoplaca melanophthalma* as a monitor in relation to phosphate refineries near Pocatello, Idaho. Great Britain, *Environmental Pollution*, 92, 91-96.
- Domeño, C., Blasco, M., Sánchez, C. & Nerín, C. (2006). A fast extraction technique for extracting polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from lichens samples used as biomonitors of air pollution: Dynamic sonication versus other methods Aragón. *Analytica Chimica Acta* 569, 103-112.
- Fernández, J. (2007). Estudio de líquenes para conocer el efecto del cambio climático. Recuperado de <http://www.ucm.es/info/ucmp/cont/descargas/prensa/tribuna1086.pdf>
- Fernández-Salegui, A. B., Arsaenio, T. y Barreno, E. (2002). Síntomas de daños por contaminantes atmosféricos en *Parmelia sulcata* Tayl. en la zona de La Robla, León, Recuperado de <http://revistas.ucm.es/far/02109778/articulos/LAZA0202110007A.PDF>
- Froehlich, A. (2006). A look at Willamette valley air quality using lichen communities as bioindicators. *Research Based Learning*, 49, 377-389.
- Fuentes, J. M. C. & Rowe, J. G. (1998). The Effect of Air Pollution From Nitrogen Dioxide (NO₂) On Epiphytic Lichens in Seville, Spain. *Aerobiol*, 14, 241-247.
- Fuga, A., Saiki, M., Marcelli, M. & Saldiva, P. (2008). Atmospheric pollutants monitoring by analysis of epiphytic lichens. *Environmental Pollution*, 151, 334-340.
- García, L. y Rubiano, O. (1984). Comunidades de líquenes como indicadores de niveles de calidad del aire en Colombia. *Contaminación Ambiental*, 8, 73-90.
- Giordani, P. (2007). Is the diversity of epiphytic lichens a reliable indicator of air pollution? A case study from Italy. *Environmental Pollution*, 146, 317-323.
- Golubev, A. V., Golubeva, V. N., Krylov, N. G., Kuznetsova, V. F., Mavrin, S. V., Aleinikov A. Y., Hoppes, W. G. & Surano, K. A. (2005). On monitoring anthropogenic airborne uranium concentrations and 235U/238U isotopic ratio by Lichen e bio-indicator technique. England, *Journal of Environmental Radioactivity*, 84, 333-342.
- Gombert, S., Asta, J. & Seaward, M. R. (2006). Lichens and tobacco plants as complementary biomonitors of air pollution in the Grenoble area (Isère, southeast France). *Ecological Indicators*, 6, 429-443.
- Hawksworth, D., Iturriaga, T. y Crespo, A. (2005). Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. *Rev Iberoam Micol*, 22, 71-82. Recuperado de <http://www.reviberoammicol.com/2005-22/071082.pdf>
- Jeran, Z., Jacimovic, R., Batic, F. & Mavsar, R. (2002). Lichens as integrating air pollutin monitors. Great Britain, *Environmental Pollution*, 120, 107-113.
- Joshi, S. R. (2008). Influence of roadside pollution on the phylloplane microbial community of *Alnus nepalensis* (Betulaceae). *Revista de Biología Tropical*, 56(3), 1521-1529. Recuperado de <http://www.ots.ac.cr/tropiweb/attachments/volumes/vol56-3/Joshi-Influence.pdf>



- Kett, A., Dong, S., Andrachuk, H. & Craig, B. (s.f.) Aprendiendo con líquenes. Uso de líquenes epífitos como indicadores biológicos de contaminación del aire. Recuperado de <http://www.greenteacher.com/articles/Lichens.pdf>
- Lijteroff, R., Lima, L. & Prieri, B. (2009). Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 25, 111-120.
- Merwin, M. C. & Nadkarni, N. M. (2001). 100 years of tropical bryophyte and lichen ecology: a bibliographic guide to the literature from 1901-2000. *Tropical Bryology*, 21, 97-118. Recuperado de http://academic.evergreen.edu/n/nadkarnn/cv/pdfs_science/100_years_Tropical_Bryology_2001.pdf
- Monge, J., González, M. I., Rivas, M. & Méndez, V. H. (2002). Twenty years of lichen cover change in a tropical habit (Costa Rica) and its relation with air pollution. *Revista de Biología Tropical*, 50, 309-319.
- Monnet, F., Bordas, F., Deluchat, V., Chatenet, P., Boutineau, M. & Baudu, M. (2005). Use of the aquatic lichen *Dermatocarpon luridum* as bioindicator of copper pollution. Accumulation and cellular distribution tests. *Environmental Pollution*, 138, 456-462.
- Nimis, P. L. (s.f.) I licheni come bioindicatori dell'inquinamento atmosferico. Italia, Dipartimento di Biologia, Università di Trieste. Recuperado de www.campus.unina.it/cms/download.jsp?id_contenuto=3528
- Munzi, S., Ravera, S. & Caneva, G. (2007). Epiphytic lichens as indicators of environmental quality in Rome. Great Britain, *Environmental Pollution*, 146, 350-358.
- Nali, C., Balducci, E., Frati, L., Paoli, L., Loppi, S. & Lorenzini, G. (2007). Integrated biomonitoring of air quality with plants and lichens: A case study on ambient ozone from central Italy. *Chemosphere*, 67, 2169-2176.
- Neurohr, E. (2010). *Líquenes como bioindicadores de la contaminación atmosférica en la zona urbana de San José*. Tesis para optar por el grado de Magister Scientiae en Manejo de Recursos Naturales. San José, Costa Rica, Universidad Estatal a Distancia.
- Policnik, H., Simoncic, P. & Batic, F. (2008). Monitoring air quality with lichens: A comparison between mapping in forest sites and in open areas. *Environmental Pollution*, 151, 395-400.
- Ramírez, A. y Cano, A. (2005). Líquenes de Pueblo Libre, una localidad andina en la Cordillera Negra (Huaylas, Ancash, Perú). *Revista Peruana de Biología*, 12, 383-396.
- Rhoades, F. M. (1999). *A review of lichen and bryophyte elemental content literature with reference to Pacific Northwest species*. United States Department of Agriculture, Forest Service Mt. Baker-Snoqualmie National Forest. Informe. Bellingham, WA.
- Rojas-Fernández, J. A., Balza-Quintero, A., Marcano, V., Rojas, P. A., Dávila-Vera, D., Peña-Contreras, Z., Mendoza-Briceño, R. V. y Palacios-Prü, E. (2008). Metabolitos secundarios de líquenes de la zona nival de la Sierra Nevada de Mérida-Venezuela y su papel en la absorción de la radiación ultravioleta. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 65, 59-72.
- Rubiano, L. y Chaparro, J. M. (2006). Delimitación de áreas de isocontaminación atmosférica en el campus de la Universidad Nacional de Colombia mediante el análisis de bioindicadores (líquenes epífitos). *Acta Biológica Colombiana*, 11, 87-102.
- Santoni, C. S. y Lijteroff, R. (2006). Evaluación de la calidad del aire mediante el uso de bioindicadores en la provincia de San Luis, Argentina. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 22, 49-58.
- Vásquez, M., Gracia, J., Vaswani, J., Santana, J., Santana, F. y González, J. E. (2006). Líquenes del género *Xanthoria* como indicadores biológicos en la bioacumulación de azufre en el sureste de Gran Canaria-España. Memorias. III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Agua, Biodiversidad e Ingeniería. Zaragoza, 25 al 27 de octubre, 2006. Recuperado de http://www.ciccp.es/biblio_digital/lcitema_III/congreso/pdf/040309.pdf
- Vergara, D., Paredes T. y Simbaña, W. (2005). Líquenes como bioindicadores de contaminación en el sitio de disposición final desechos sólidos, Isla Santa Cruz, Galápagos. Memorias. II Congreso Internacional de Bosque Seco. V Congreso Ecuatoriano de Botánica. III Congreso de Conservación de la Biodiversidad de los Andes y la Amazonía. Loja, Ecuador. 14 al 17 de noviembre, 2005. Recuperado de http://www.rio-b.com/pdf/0509walter_Liquenes_junio05.pdf
- Weissman, L., Fraiberg, M., Shine, L., Garty, J. & Hochman, A. (2006). Responses of antioxidants in the lichen *Ramalina lacera* may serve as an early-warning bioindicator system for the detection of air pollution stress. Tel Aviv University, Ramat Aviv, Tel Aviv, Israel. *FEMS Microbiology Ecology*, 58, 41-53.
- WHO. (2003). *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide: Report on a WHO Working Group*. Informe. Bonn, Germany.