



Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos

David L. Hawksworth¹, Teresa Iturriaga² y Ana Crespo¹

¹Departamento de Biología Vegetal II, Facultad de Farmacia, Universidad Complutense, Madrid, España y

²Departamento de Biología de Organismos, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Baruta, Edo. Miranda, Venezuela

Resumen

Los líquenes tienen un importante papel como bioindicadores de lectura inmediata de la contaminación medioambiental, de los cambios climáticos y de la estabilización del suelo. Se han realizado muchos trabajos acerca de este tema en regiones templadas, pero tan solo en algunos pocos casos las técnicas empleadas en este tipo de estudios han sido utilizadas en los trópicos. La mayor parte de las investigaciones realizadas en los trópicos hasta la fecha, se relacionan con la contaminación ambiental y perturbaciones forestales, pero estas han sido ejecutadas tan solo en algunos pocos lugares, y permanecen aún sin realizar en la mayoría de las regiones tropicales. Las ventajas que poseen los líquenes para ser utilizados como bioindicadores de lectura inmediata en los trópicos se basan en que los trabajos pueden ser realizados sin la identificación total de las especies involucradas, y en el hecho de que son perennes y fácilmente discernibles a simple vista o con la ayuda de una lupa de campo. Esto último constituye un factor importante, ya que la falta de entrenamiento para la identificación es el principal problema en la realización de este tipo de investigaciones. En esta revisión se incluye una extensa lista de referencias bibliográficas.

Palabras clave

Dióxido de azufre, Daños forestales, Metales pesados, Contaminación acuática, Cambio climático, Estabilización del suelo

Lichens as rapid bioindicators of pollution and habitat disturbance in the tropics

Summary

Lichens have value as bioindicators of environmental pollution, climate change, and ecological continuity. Extensive work has been undertaken in temperate areas, but in only few cases have the techniques been applied in the tropics. Most tropical studies to date are in relation to air pollution and forest disturbance, but these are scattered geographically and remain to be undertaken in most tropical regions. The potential of lichens as rapid bioindicators in the tropics can start to be realized even where the species described are not fully identified as they are perennial and separable by eye or hand lens, and a lack of training is identified as the main constraint. An extensive bibliography is included.

Key words

Air pollution, Forest disturbance, Heavy metals, Water pollution, Climate change, Soil stabilization, Sulphur dioxide

Dirección para correspondencia:

Prof. Teresa Iturriaga
Departamento Biología de Organismos
Universidad Simón Bolívar
Apartado 89000, Sartenejas, Baruta
Edo. Miranda, Venezuela
Tel.: +58 212 9063054
Fax: +58 212 9063064
Correo electrónico: titurri@usb.ve

Los líquenes no son organismos individuales sino asociaciones mutualistas entre hongos y algas (o cianobacterias), que pueden funcionar en la naturaleza como una unidad. Típicamente los tejidos del hongo rodean al alga (o cianobacteria) fotosintética, y es la relación entre esta pareja lo que determina el tipo de desarrollo: en forma de costra (crustáceo), en forma de hoja (foliáceo), o de diminuto arbusto (fruticuloso). Con relación a su nomenclatura, los nombres científicos que se aplican a los líquenes se refieren exclusivamente al hongo, y la clasificación de los hongos formadores de líquenes (liquenizantes) se encuentra hoy en día bien integrada con el resto de los hongos; las algas y las cianobacterias llevan nombres científicos separados. Para una mayor información acerca de los líquenes y su biología ver Hawksworth [42], Honegger [56], Nash [74] y Richardson [87]. Otra literatura de interés en castellano, catalán, gallego y portugués son Filho y Toledo [29], Llimona [64], Umaña y Sipman [102], Barreno y Pérez-Ortega [6], Pérez y col. [83] y otras. Marcelli y Seaward [70] presentan un compendio sobre el estado de la liquenología en Latinoamérica, donde presentan no sólo la historia de ésta, sino muchas de las investigaciones realizadas en este campo, así como sus posibles aplicaciones.

La contaminación se define operativamente en términos de concentraciones por encima de los niveles aceptados por la ley. Las técnicas para valorar la contaminación son costosas, por lo que la utilización de líquenes como biomonitores se generaliza cada vez más. Éstos permiten una medición inmediata de los niveles de contaminación en grandes áreas y, por lo tanto, actúan como señales de alarma. Sin embargo es importante comprender que los líquenes nunca podrán reemplazar totalmente a los equipos técnicos que miden contaminación ambiental. Un trabajo muy completo sobre el papel de los líquenes como indicadores de contaminación es el de Nimis y otros [78].

Se puede definir un organismo bioindicador, en su sentido amplio, como aquél cuyas funciones vitales se relacionan con efectos medio ambientales, tanto naturales como antropogénicos, de tal manera que pueden ser utilizados para señalar la presencia de alguno de estos factores [44]. Otros autores [4,53,95] utilizan el término en un sentido más restringido, para referirse a aquellos organismos cuya presencia indica la existencia de contaminantes antropogénicos, pudiendo éstos reemplazar la utilización de equipos técnicos. Hawksworth [44] aportó definiciones precisas de los términos que han sido utilizados frecuentemente de forma confusa en la literatura (Tabla 1).

En el siglo XIX, los líquenes fueron reconocidos por primera vez como posibles bioindicadores [79], pero no fue hasta 1960 -al ser identificado el dióxido de azufre como el factor principal que influencia el crecimiento, distribución y salud de los líquenes- cuando ocurrió un crecimiento exponencial de los estudios que utilizaban los líquenes como biomonitores, teniéndose hoy en día más de 2.000 trabajos publicados sobre este tema, incluyendo varios libros y una serie acerca de literatura líquénica publicada en "The Lichenologist" (1974-2000). Actualmente se conoce que, además del dióxido de azufre, una amplia gama de otros compuestos (amoníaco, fluoruros, el polvo alcalino, metales y metales radioactivos, hidrocarburos clorados), así como la eutrofización y la lluvia ácida, pueden ser detectados y monitorizados utilizando líquenes. En muchos países europeos y en Estados Unidos se utilizan líquenes para monitorizar los efectos causados por contaminación gaseosa y por metales. Hoy en día se les reconoce como bioindicadores de ciertos contaminantes y daños al medio ambiente en la zona templada. Más aún, en el Reino Unido se les incluye, por esta razón, en los programas docentes del último año de la enseñanza primaria y el bachillerato.

Tabla 1. Definiciones de términos empleados en el tema de los bioindicadores (adaptado de Hawksworth, 1992, [44]).

Término	Definición
Bioindicadores	Organismos que manifiestan síntomas particulares en respuesta a cambios medioambientales, generalmente de manera cuantitativa.
Biomonitores	Organismos, su distribución o poblaciones, estudiadas a lo largo del tiempo y comparadas con valores estándar o encuestas (base -line survey), tomando en cuenta las desviaciones del comportamiento esperado.
Bioacumuladores	Organismos que acumulan sustancias particulares dentro de sus tejidos, cuyas concentraciones se determinan mediante métodos químicos.
Biomarcadores	Cambios fisiológicos o bioquímicos ocasionados por compuestos químicos en un organismo.
Biopruebas (bioprobes)	Exámenes (tests) biológicos sintomatológicos que comprenden un organismo bioindicador introducido (cultivado) y una unidad de registro.
Bioensayo	Organismos que responden de una forma cuantitativa a la aplicación de alguna sustancia particular, y cuyas respuestas se miden mediante comparación con los efectos causados por sustancias de concentraciones conocidas.

Las razones por las cuales los líquenes están siendo utilizados con tanto éxito en este campo se basan en:

1. Son ubicuos y actualmente se encuentran en aumento en muchos centros urbanos, sobre todo en países desarrollados, gracias a la disminución en la concentración de dióxido de azufre en la atmósfera de las ciudades.
2. No poseen una cutícula protectora y absorben nutrientes y contaminantes a través de gran parte de su superficie.
3. Su naturaleza simbiótica, ya que si cualquiera de los simbiontes se ve afectado por algo, ambos organismos mueren.
4. Son relativamente longevos, permaneciendo expuestos al efecto nocivo por largos períodos, por lo que proporcionan una imagen de estados crónicos y no de variaciones puntuales del medio ambiente.
5. Son organismos perennes que pueden ser muestreados durante todo el año.

Las asociaciones líquénicas resultan particularmente atractivas para ser utilizadas como bioindicadoras, ya que la longevidad, y el hecho de que obtienen la mayor parte de sus nutrientes de la atmósfera, no suele darse simultáneamente en otros seres vivos de comparable sensibilidad. Asimismo, algunos líquenes tienen requerimientos ecológicos restringidos o rangos de dispersión limitados. Estas particularidades hacen a los líquenes especialmente sensibles a los cambios del hábitat y del medio ambiente, lo que hace que sean ampliamente utilizados como biomonitores en diferentes ecosistemas. En muchos casos pueden ser identificados por no especialistas, que pueden realizar un seguimiento sencillo con un mínimo de trabajo post-campo. Como resultado, los líquenes han sido utilizados como bioindicadores en una amplia gama de situaciones, como se condensa en la Tabla 2 [adaptada de 96].

El número de estudios que han utilizado los líquenes como bioindicadores en el trópico es todavía limitado [30,109,112]. A pesar de los pocos resultados disponibles, la alta biodiversidad líquénica que existe en los trópicos permite inferir que existe un gran potencial para poderlos emplear con este objetivo. Coppins y Wolseley [16] presentan una muy completa síntesis acerca de los diferentes

Tabla 2. Eventos en los que los líquenes pueden ser utilizados como bioindicadores (adaptado de Stork y Samways, 1995, [96]).

Contaminantes medio-ambientales
• Lluvia ácida
• Eutrofización por amonio
• Hidrocarburos clorinados
• Contaminación por metales pesados
• Derrames de hidrocarburos
• Contaminación aérea por dióxido de azufre
• Radionucleidos
Cambios climáticos
• Radiación UV
• Niveles en el agua
Continuidad ecológica
• Bosques deciduos
• Bosques de coníferas
• Fuego
• Estabilidad de superficies

papeles que desempeñan los líquenes en bosques tropicales, incluyendo su papel como indicadores de continuidad ecológica, y como indicadores de cambios inducidos por el fuego, manejo de bosques y otros factores que les afectan.

El presente trabajo toma nota de las investigaciones que han utilizado los líquenes como bioindicadores en el trópico, y explora situaciones donde sus usos potenciales permanecen aún sin explotar.

Contaminación medioambiental

Ha habido una enorme cantidad de trabajos realizados acerca del uso de los líquenes como bioindicadores de varios tipos de contaminación medioambiental, y por esta razón, en esta publicación, solo se llamará la atención sobre algunos de esos aspectos. Anualmente se publican más de 150 artículos al respecto, pero afortunadamente, la literatura pertinente en este tema en el ámbito mundial ha sido resumida en "The Lichenologist" desde 1974 (mencionado arriba). También han sido publicado un cierto número de trabajos de síntesis [7,27,43,44,49,57,75,77,78,86] que resumen la información. Sin embargo, en los países tropicales con excepción de las zonas urbanas, la contaminación en general es un problema menor, siendo de mucha mayor gravedad la destrucción de bosques debido a los cambios causados en el uso del suelo [106].

Contaminación aérea. Debido a que los organismos epífitos reciben la mayor parte de sus nutrientes a partir de la atmósfera, son más susceptibles a los factores atmosféricos y, por lo tanto, constituyen sustratos ideales para ser utilizados como bioindicadores. Entre éstos, resaltan los epífitos folícolas, ya que dependen, todavía en un mayor grado, de los factores atmosféricos, porque su unión al sustrato es menos pronunciada para que la superficie foliar permanezca intacta [67].

Varios autores iniciaron el mapeo de las especies líquénicas presentes en las grandes ciudades de todo el mundo, diferenciando zonas de distinto grado de salubridad del aire mediante la presencia o ausencia de ciertas especies de líquenes o por la estructura de los talos (crustáceos, foliáceos o fruticulosos) de las especies presentes, detectando algunas especies como las más tolerantes en las regiones templadas europeas (*Lecanora conizaeoides*, *Scoliosporum chlorococcum*, *Amandinea punctata* o *Phaeophyscia orbicularis*) al tiempo que *Lobaria pulmonaria*, *Lobaria amplissima* o especies pertenecientes a *Usnea* se popularizaron pronto como las más sensibles en estas regiones.

Vareschi [103] utilizó por primera vez los líquenes como bioindicadores en un país del trópico. Como habían hecho otros autores en regiones templadas a partir de mediados del siglo XIX (ver revisiones [9,40,41,47]), el mencionado autor mapeó las zonas habitadas por líquenes en Caracas-Venezuela, diferenciando un desierto de líquenes (sin macrolíquenes sobre los árboles), una zona externa, otra interna de conflicto, y una zona normal. En esa época, no se conocía la correlación entre la presencia de éstos y los niveles de contaminación, y solo fue dos décadas más tarde [104] cuando se verificó la correlación entre las comunidades de líquenes sobre amplias áreas geográficas y la concentración de los contaminantes en éstas. Bretschneider y Marcano [10], también en Venezuela, utilizaron líquenes como indicadores de contaminación causada por metales pesados y otros agentes en el Valle de Mérida. Asimismo, García y otros [33] realizaron un estudio sobre indicadores de contaminación en la ciudad de Guarulhos, Estado de Sao Paulo, Brasil.

Estrabou [23] estudió en 1998 las diferencias de la flora líquénica y el porcentaje de su recubrimiento sobre troncos en cuatro zonas de la ciudad de Córdoba, Argentina, con el propósito de establecer un sistema permanente de monitoreo para toda la ciudad. Se encontraron 29 especies en el área control, mientras que ninguna especie estuvo presente en las zonas urbanas, las cuales podrían ser consideradas como una zona desierta. También descubrió que algunas especies de líquenes se desarrollaban mejor en los medios urbanos en donde los niveles de contaminación eran altos en contraste con su desarrollo en áreas rurales. Después de 7 años de monitoreo, encontró que las especies más sensibles a los contaminantes eran *Ramalina eckloni* y *Usnea* sp.; *Parmotrema reticulatum* y *Punctelia hypoleucites* eran especies tolerantes, mientras que *Physcia undulata*, *Hyperphyscia variabilis* y *Hyperphyscia endochrysea* eran resistentes.

En Inglaterra y Gales, se realizaron mapas de 11 zonas y se encontró correlación con los niveles de dióxido de azufre, pero no con los niveles de humo [49]. En los trópicos, la primera correlación entre un líquen y el dióxido de azufre fue realizada con *Parmotrema tinctorum* sobre lápidas en cinco ciudades de Japón [97] y, desde entonces, en ese país se ha utilizado frecuentemente esta especie como bioindicadora.

Desde los años 70 ha habido un crecimiento exponencial de trabajos realizados en este campo, entre los cuales cabe destacar los de Seaward [92]. Se produjeron diferentes métodos para estudiar la variación de la diversidad de los líquenes en las áreas contaminadas y se presentaron índices cuantitativos [19,61] que pudieran facilitar las condiciones de seguimiento y monitorización. En el Reino Unido se han elaborado elementos didácticos, que se han publicado y puesto a disposición de niños en las escuelas, como carteles murales y dibujos a color de las especies indicadoras (por ejemplo, los editados por el Natural History Museum de Londres en 1982). En Italia se utilizó a gran escala un sistema numérico computarizado para producir mapas tridimensionales [77]. Una contribución muy llamativa de estos estudios fue la realizada en Italia [14], que estableció la correlación entre las zonas delimitadas por los líquenes que reflejaban los grados de contaminación y la frecuencia de cáncer del pulmón.

En cuanto a la recuperación de la calidad atmosférica, cuando los niveles de dióxido de azufre disminuyen, la recolonización de líquenes que habían desaparecido de alguna zona particular puede comenzar con bastante rapidez. Esto ha sido comprobado en varias grandes ciudades entre las que puede servir como ejemplo el caso de Londres. Desde que en 1983 dejó de funcionar una central térmica

contaminante en el interior de la ciudad, especies que antes se encontraban refugiadas en la periferia del gran núcleo urbano, han migrado de nuevo al centro de Londres, incluyendo algunas especies que no se habían visto en el área desde hacía más de 200 años [48]. Los jardines del Palacio de Buckingham tenían tan solo dos especies de líquenes en 1964, y unos treinta años después presentaban 39 especies [45]. A grandes rasgos, al ir descendiendo los niveles de contaminación, las especies más tolerantes aparecen en primer lugar y sucesivamente las más sensibles con la progresiva mejoría de la calidad del aire. Hay, con todo, sutiles variaciones en la tolerancia de las especies recolonizadoras aún no bien comprendidas [17,18].

Seaward [93] realizó una revisión de este tema y mostró que la información recopilada acerca de la distribución y ecología de líquenes en West Yorkshire, Reino Unido, ha permitido documentar los cambios cuantitativos y cualitativos en los niveles de contaminación.

Como se ha dicho, los patrones de recolonización son de interpretación difícil ya que la presencia de unas u otras especies se podría ver influenciada por el conocido "efecto fundador". Este concepto ecológico explicaría el que las primeras especies en implantarse cuando las condiciones mejoran se ven favorecidas en el nuevo espacio. No obstante, también podría interpretarse que las especies más sensibles podrían estar ausentes debido más a una escasez de propágulos que a los niveles de contaminación.

En los trópicos, existe una situación paralela a pesar de estar involucradas especies diferentes a las que se encuentran en la zona templada. En Jamaica, por ejemplo, entre las especies tolerantes se destacaron *Graphis afzelli* y *Trypethellium eluteriae* [21]. Cerca de Madrás (Hawks-worth, inédito), en donde los efectos del dióxido de azufre se hicieron sentir sobre un área muy amplia, un indicador de la calidad de aire particularmente eficiente resultó ser *Rocella montagnei*. Asimismo, en Hangzhou, China, el líquen más tolerante fue una especie de *Lepraria* que, curiosamente, resultó ser un taxon nuevo para la ciencia [51] (Figura 1). La capacidad para poder identificar a los líquenes involucrados no es un factor crítico, siempre y cuando la especie pueda ser reconocida a nivel de morfoespecie en el campo (Figura 2a). Los patrones, las formas de vida y el número de morfoespecies que están presentes a diferentes distancias de los centros de ciudades y de las fuentes de contaminación, son iguales en Europa y en Norteamérica donde, por lo general, hay datos históricos previos; en algunos pocos casos de ciudades localizadas en el trópico, existen también referencias históricas que evidencian la caída en el número de especies líquénicas a partir de 1897,



Figura 1. Transecta entre el aeropuerto de Hangzhou (provincia Zhejiang, China) y el centro de la ciudad, mostrando la disminución del número de especies con diferentes tipos de crecimiento en árboles de camphor de esta región subtropical [51]. Ver también figura 2a.

como en el caso de Río Grande en Brasil [80]. En otras circunstancias, como en Argentina [62], China [13,115], Indonesia [98], Korea [113] y São Paulo en Brasil [33,69], se ha notado la disminución de líquenes en áreas urbanas o industriales, pero sin que este fenómeno haya sido relacionado con valores de contaminación.

La región tropical que ha sido objeto del inventario más detallado hasta la fecha (elaborado por Aptroot y Seaward) es Hong Kong [3]. Estos investigadores catalogaron 261 especies de líquenes, de las cuales 176 eran documentadas por primera vez en Hong Kong, 27 nuevas especies para Asia y cuatro nuevas especies para la ciencia. Asimismo, mediante comparaciones entre citas antiguas y recientes obtenidas de diferentes autores, mostraron que muchas especies de *Lobarion* habían desaparecido como resultado de la contaminación ambiental y otras perturbaciones.

Thrower [99] preparó una publicación especial con objeto de que niños en edad escolar de Hong Kong pudieran mapear con la presencia/ausencia de especies de líquenes en seis zonas, su relación con niveles conocidos de dióxido de azufre; participaron 1.402 niños de 69 escuelas, y los resultados fueron satisfactorios [92].

Saipunkaew y otros [89], estudiaron líquenes sobre árboles de mango en el área de Chiang Mai en Tailandia, utilizando para ello mallas de 10 X 10 cm. Encontraron un mayor número de especies de líquenes crustáceos que de líquenes foliáceos en las regiones ubicadas a baja altitud, así como una menor diversidad de especies de líquenes en ciudades con poblaciones de más de 20.000 habitantes; en éstas, encontraron comunidades constituidas por especies de líquenes tolerantes a la contaminación como *Hyperphysis adglutinata* y *Pyxine cocoas*.

Sin embargo, existen muy pocos trabajos realizados en países tropicales que se hayan referido al aspecto de la recolonización o regeneración ambiental. Excepcionalmente, en la ciudad de Caracas, Venezuela, fue inventariada por segunda vez en 1973, encontrándose que la zona que estaba desierta de líquenes en 1953 había aumentado su número de especies del 13% al 89% en el área que había sido previamente estudiada [104].

En relación con la heterogeneidad que presentan los diferentes forofitos como sustrato de líquenes, la mayoría de los autores discriminan sobre unos u otros tipos para establecer muestreos comparables, al menos dentro de áreas geográficas con clima parecido. Así pues, en grandes regiones aún no suficientemente estudiadas, como las tropicales, podría ser ventajoso el utilizar algunas plantas particulares, con el fin de facilitar comparaciones con vistas al futuro entre diferentes áreas. La palma del coco, *Cocos nucifera*, es uno de los posibles candidatos ya que puede tolerar un gran número de especies de líquenes, y se encuentra distribuida a través de la mayor parte del trópico. Barclay-Estrup [5] recolectó 20 especies de líquenes sobre 30 palmas cocoteras en Belice, encontrando diferencias en la distribución de las especies de líquenes al comparar las encontradas sobre palmas ubicadas a lo largo de la costa, y aquéllas localizadas tierra adentro. También fueron catalogados siete líquenes sobre manglares en el mismo país.

Como ya se ha mencionado, en la mayoría de los casos la desaparición de líquenes se debe a la contaminación producida por el dióxido de azufre, pero los fluoruros también pueden ser muy tóxicos localmente, algo que ha sido constatado en el caso de China [63]. El ozono, los óxidos de nitrógeno, y otros contaminantes gaseosos que emanan de los automóviles, parecen tener en general una importancia relativamente menor con relación a su efecto sobre los líquenes. Sin embargo, en la Argentina se ha po-

dido establecer la correlación entre la supervivencia de ejemplares transplantados de la especie *Ramalina ecklonii*, con la densidad del tráfico automotor [62]. El amoniaco producido como consecuencia de prácticas intensivas de cultivo [19] y el polvo alcalino de obras realizadas con cemento [35], pueden estimular el crecimiento de algunas especies en detrimento de otras. Lo que está claro es que cualquier cambio perceptible de los patrones de desarrollo e identidad de las especies epifitas, debe ser una causa que propicie la realización de estudios más críticos. De esta manera, se puede llamar la atención sobre este tipo de problemas antes de que los efectos de los contaminantes sobre los árboles y cultivos se conviertan en algo más drástico o dañino.

Biazrov [9] recopila una extensa lista del material publicado que trata acerca de las aplicaciones que pueden tener los patrones de distribución y desarrollo de los líquenes, como monitores del medio ambiente, principalmente en lo relacionado con la calidad del aire en Moscú. Asimismo, Batic [8] describe los métodos utilizados para la biomonitorización por líquenes de la contaminación causada por dióxido de azufre.

Metales pesados y radiactivos. Los líquenes también absorben metales pesados que se acumulan en sus tejidos y pueden ser estudiados mediante métodos químicos para determinar la presencia de éstos [84]. De nuevo, la literatura en este punto es extensa y puede estar cubierta en los trabajos mencionados anteriormente. Un trabajo particularmente preciso que demuestra el tipo de estudio que se puede hacer en largos intervalos de tiempo ha sido el realizado en la isla Plumier, en el río Potomac, bajo la autopista Washington en Estados Unidos. En este caso, a partir de la construcción de la autopista, los niveles de plomo en *Xanthoparmelia baltimoriensis* subieron en respuesta al aumento de tráfico, pero luego, cuando se reguló legalmente el uso del combustible sin plomo [60], disminuyeron a los niveles que tenían en 1930. Del mismo modo que en otros capítulos, los ejemplos para las regiones tropicales son poco numerosos a este respecto, no obstante Nayangababo [76] comparó los niveles de cinco metales en líquenes sobre árboles urbanos y rurales en el interior y en los alrededores de Kampala (Uganda). Gordon y otros [38] analizaron la deposición de metales en *Hypotrachyna endochlora* (citado como *Parmelia madagascariensis*) *in situ* y en especímenes trasplantados en bosques nublados argentinos, y encontraron niveles elevados de plomo en el material trasplantado comparado con las muestras *in situ*.

El mismo tipo de acumulación ocurre con metales radiactivos, como se demostró por el desastre de Chernobyl en 1986 [94]. Asimismo, Wu y otros [114] realizaron un inventario preliminar acerca de la acumulación de isótopos en 22 líquenes de diferentes partes de China.

A pesar de que los líquenes se limitan a absorber los metales disueltos en el agua que reciben, si son tóxicos, los líquenes pueden verse afectados. Cuando esto ocurre los líquenes pueden ser bioindicadores de la presencia del tóxico en el ambiente. Así, los líquenes pueden resultar eliminados de los tejados al recibir continuamente el goteo de alto contenido en cobre proveniente de líneas de alta tensión [11]. El plomo resulta aparentemente menos tóxico que el cobre o el hierro, aunque tiene un efecto negativo sobre algunas especies [37]. En contraste, los mismos autores señalan que el hierro resulta un sustrato favorable para el crecimiento de algunas especies particulares de líquenes [11].

Mientras que los análisis de metales pesados requieren el uso de equipo instrumental especializado, las

muestras de líquenes para estudiar patrones de sustitución o de colonización pueden ser observadas y catalogadas rápidamente sobre grandes áreas.

Heinrich y Remele [52] describen los métodos utilizados para la monitorización de la acumulación de metales radiactivos por líquenes. Garty [34] hace otro tanto con los métodos utilizados para el seguimiento de la contaminación causada por metales pesados, y Batic [8] con la bioindicación de la alteración por dióxido de azufre.

Quilhot y col. [85] demostraron que los líquenes han desarrollado estrategias a nivel químico, a fin de minimizar los daños inducidos por el aumento de las radiaciones UV como consecuencia de la disminución de la capa de ozono de los últimos años, desarrollando una serie de compuestos fotoprotectores, los cuales podrían ser utilizados para estimar las cantidades de radiación UV.

Contaminación acuática. Debido a que las asociaciones líquénicas son principalmente terrestres, para su supervivencia requieren de regímenes que permanezcan secos al menos temporalmente. Por ello, las comunidades y poblaciones de líquenes se ubican en los márgenes de ríos y lagos sujetos a variaciones en el nivel del agua, en las zonas intermareales o en otras relacionadas con el rompimiento de las olas [46]. En el caso concreto de las especies cuya ecología requiere de largo tiempo de inmersión, éstas pueden verse afectadas por la actividad humana, especialmente por vertidos de petróleo o detergentes. Esto puede ocurrir tanto en costas marinas como en las de lagos y riveras de ríos o corrientes de agua. Sin embargo, las investigaciones para dar solución a estas preguntas apenas han comenzado [37] y no se tienen ejemplos en el trópico. Aunque son escasas, se han realizado inventarios de las especies que crecen en estos ambientes [46,101], y se conocen aproximadamente 700 especies de líquenes de las zonas intermareales y 200 de los márgenes de ríos y lagos.

Niveles de cauces, caudales y mareas

Como se acaba de mencionar, además de en las costas marinas, también hay líquenes que crecen en zonas a lo largo de los márgenes de lagos y ríos. La posición de las bandas formadas por diferentes líquenes en relación con los límites de caudal pueden ser utilizadas con el fin de comparar la capacidad del río o lago. Tal estrategia ha sido empleada singularmente en Australia [39]. Asimismo, los patrones de zonación formados por líquenes a lo largo de los cursos de agua en kopje (cantos rodados) en Zimbabwe [91] evidencian que esta técnica puede ser aplicada en regiones tropicales.

Cambio climático

La tasa de crecimiento de los líquenes también se ve afectada por la longitud de su estación de crecimiento, disponibilidad de agua y temperatura, de manera que los cambios en el incremento del crecimiento radial anual de líquenes foliáceos o crustáceos circulares pueden ser también indicativos de ciertas tendencias [58,90]. Sancho y Pintado [90] encontraron altas tasas de crecimiento anual en algunas especies de líquenes en la Antártida, y sugirieron que este factor podía estar relacionado con la rápida desaparición tanto de la capa de hielo en la isla Livingston, como de glaciares debido a los efectos del calentamiento global en la Península Antártica.

Fuego

La abundancia de especies de líquenes, su distribución, recolonización, y la composición y combinación de especies, pudo correlacionarse con la frecuencia y comportamiento de incendios ocurridos en áreas de vegetación del *cerrado* brasilero [72,73]. Los estudios de Misty [72] han sugerido que la composición de las comunidades, y los listados de especies de líquenes, podrían utilizarse en cualquier ecosistema en donde el fuego juegue un papel dominante. Un bosque después de un incendio no recupera con facilidad la composición de flora y comunidades líquénicas anteriores al incendio. Conocida en el tiempo la sucesión de recolonización de las especies, su uso como bioindicadores de recuperación del bosque es inmediato.

Existen pocos trabajos realizados en el tema, y se necesitan muchas más investigaciones en estas regiones a fin de conocer mejor tanto los efectos del fuego como el dinamismo de las comunidades líquénicas.

Continuidad ecológica

La aplicación más importante de uso generalizado, y con el mayor potencial de utilizar los líquenes como bioindicadores en los trópicos, es con relación a las perturbaciones en los bosques. Algunas especies no pueden dispersarse de un árbol a otro mas allá de distancias críticas y por esto pueden utilizarse como indicadoras para

saber si la cubierta forestal se ha mantenido en un lugar por un largo periodo de tiempo. Estos periodos de tiempo pueden ser muy largos debido a la biología y tasas de crecimiento de los líquenes y también a las extremadamente precisas condiciones ecológicas que requieren algunas especies [15].

Los líquenes que poseen ascosporas u otros propágulos de tamaños grandes, o que tienen necesidades particularmente exigentes en cuanto al tipo de hábitat en el cual se desarrollan, podrían desaparecer permanentemente de un lugar después de una interrupción drástica en la continuidad de su hábitat, por ejemplo debido a los efectos de tala, explotación forestal o fuego. El principio en el cual se basa la utilización de los líquenes como indicadores de la presencia de bosques muy antiguos, ha sido principalmente desarrollado en Europa [88], y ha sido corroborado mediante estudios realizados en Norteamérica y también en bosques templados del hemisferio sur. Basándose en estudios realizados en Indonesia, Malasia y Tailandia, Wolseley [107] encontró que las comunidades de *Lobarion* respondieron a las perturbaciones de una manera similar a la efectuada en bosques templados. Aptroot y Seaward [3], además, comprobaron la disminución drástica de especies de macrolíquenes, características de la vegetación de *Lobarion*, en Hong Kong, la cual utilizaron como bioindicadora de contaminación atmosférica y otros tipos de perturbaciones medio ambientales. Se refirieron, principalmente, a la deforestación, frente a la que estas especies son muy sensibles, y su desaparición pone en peligro la biodiversidad líquénica en Hong Kong.

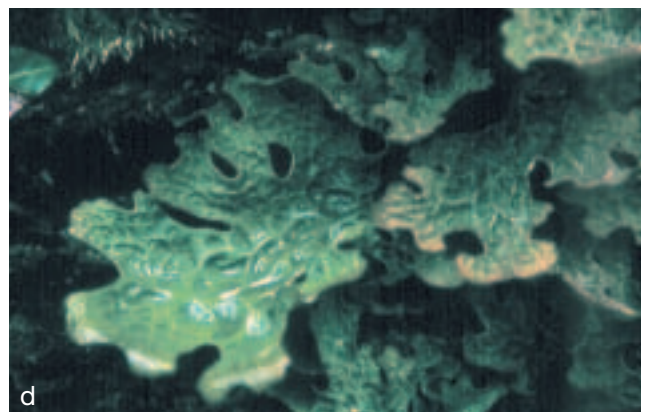
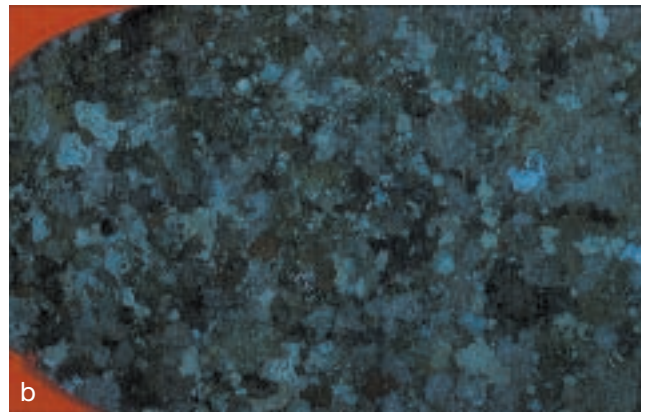


Figura 2. a: Monitores medio ambientales, empleados del Departamento de Salud Gubernamental y forestales estudiando líquenes sobre árboles de camphor en Hangzhou (Provincia Zhejiang, China), los datos de colección se presentan en la figura 1; b: Mosaico de líquenes folícolas sobre una hoja de una selva tropical en Malasia; c: *Thelotrema lepadinum*, ejemplo de un líquen costroso, indicador de bosques antiguos; d: *Lobaria pulmonaria*, ejemplo de un líquen folioso indicador de bosques antiguos.

Como era de esperar, estos estudios han mostrado que en los trópicos operan los mismos principios que se habían observado en las regiones templadas. Además, por lo general, se han podido utilizar como bioindicadoras para los trópicos, especies relacionadas con las estudiadas habitualmente en Europa y América del Norte (Ej. *Lobariaceae*, *Thelotremataceae*, Figura 2 c-d); sin embargo en otras muchas ocasiones pueden y deben ser utilizadas otras especies líquénicas frecuentes o útiles de entre el gran número de especies y comunidades fundamentalmente tropicales. En la práctica, muchos de los líquenes que se usan, o pueden usarse, en el trópico como valiosos indicadores de perturbaciones forestales, solo necesitan ser identificados a nivel de familia o género para poder ser utilizados con esa finalidad. Por ejemplo, estudios detallados realizados en Tailandia han demostrado que la separación en el rango de familia de los líquenes allí presentes es suficiente para indicar si un bosque ha sido afectado por el fuego [110]. Las autoras relacionaron la presencia de una especie particularmente llamativa, *Letrouitia vulpina*, con los bosques lluviosos no alterados. Asimismo, Wolseley y Aguirre-Hudson [111] realizaron una investigación acerca de comunidades epifitas de líquenes como indicadores de cambios medioambientales al norte de Tailandia, y propusieron una lista de taxones como indicadores del tipo de bosque antiguo (maduro) y bosque alterado. A fin de poder estimar tasas de cambio en bosques monzónicos en el sudeste de Asia, sugirieron el procedimiento de realizar inventarios cuantitativos, en el rango de género y especie, de los taxones indicadores.

Mohan y Hariharan [71] estudiaron líquenes en comunidades de manglares al sur de la India sometidos a diversos grados de perturbación. Los autores contaron el número de colonias presentes utilizando mallas de 30 cm. Observaron que especies de *Pyrenula* estaban restringidas a lugares no perturbados, mientras que las especies de *Dirinaria* y *Roccella* se encontraron en áreas perturbadas. También Barclay-Estrup [5] citó siete especies de líquenes sobre manglares en Belice.

Wolseley [108] describe métodos para el monitoreo de líquenes cortícolas en bosques tropicales con el fin de poder calcular cambios medio ambientales basándose en el método propuesto con anterioridad en Tailandia [110].

Los mosaicos formados por líquenes, hongos no liquenizados, algas y hepáticas, son comunes sobre las hojas perennes en las regiones húmedas tropicales (Figura 2b). Éstos han sido bien documentados en varios países, pero especialmente estudiados desde el punto de vista ecológico en Costa Rica, en donde Lücking [65,66] encontró que de las aproximadamente 334 especies de líquenes folícolas conocidos en Costa Rica, 213 especies se encontraron en una sola localidad, y 39 sobre una sola hoja. Lücking [67] destacó que éstos eran especialmente buenos indicadores

de factores microclimáticos y de perturbaciones antropogénicas, detectando muchas especies restringidas a bosques primarios. Lücking [67] propuso una lista preliminar de 300 especies de líquenes folícolas y estableció categorías (índices de valor ecológico) con relación a diferentes tipos de perturbaciones forestales (Tabla 3). Especies del género *Badimia*, por ejemplo, mostraron correlación con los bosques menos perturbados en Costa Rica, y se ha recomendado sean utilizadas para identificar lugares con una alta biodiversidad y, por ende, con un valor particular en cuanto a su conservación [66]. Farkas y Hawksworth [25] también han observado este fenómeno en Trinidad, en donde tan solo dos de un total de 15 especies de líquenes se encontraron tanto en bosques primarios como en bosques regenerados. Un amplio catálogo de líquenes folícolas con observaciones ecológicas es el realizado por Etayo [24] en la isla de Coiba (Panamá).

Contrariamente a lo anterior, la capacidad de los líquenes foliáceos como indicadores de zonación altitudinal y de estacionalidad es, aparentemente, bastante limitada. Sin embargo, como se ha visto, éstos tienen un gran potencial como indicadores de perturbaciones antropogénicas y microclimáticas.

Son varias las ventajas en la utilización de líquenes foliáceos como bioindicadores de perturbaciones forestales; entre ellas están su alta sensibilidad a factores microclimáticos, su crecimiento bidimensional, su mejor conocida taxonomía (en relación con la mayoría de los microlíquenes), la facilidad de su recolección y documentación, y su alta diversidad en tierras bajas tropicales, sobre todo si se trata de regiones más o menos húmedas. Se han definido diversas clases de índices en estudios de este tipo, basados en las preferencias de hábitat y microclima de estos líquenes. Existen muchos otros índices de valor ecológico que se han aplicado a líquenes como, por ejemplo, los utilizados para líquenes epifitos en las Islas Británicas [15].

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. En este sentido, los líquenes han demostrado ser también buenos bioindicadores. Kantvilas y Jarman [59] analizaron comunidades líquénicas epifitas en una selva nublada de Tasmania, mientras que Wolsley y Aguirre-Hudson [109] mostraron que los líquenes pueden ser utilizados como indicadores de cambio climático en un bosque tropical en Tailandia, y Galloway [30] interpretó lo mismo para líquenes en Laguna San Rafael al sur de Chile.

En el caso de bosques tropicales con una regeneración rápida, no resulta siempre fácil identificar rápidamente cuáles son los bosques nativos con mayor antigüedad y que merecen una mayor atención para su conservación. Los líquenes tienen un enorme potencial desde este punto de vista.

En los desiertos áridos y calientes, los líquenes pueden ser un componente importante de la biota de estos parajes, uniendo las partículas de suelo y fijando el carbono y nitrógeno del aire. Existe evidencia que demuestra que las comunidades sobre suelo reaccionan a las perturbaciones de una manera similar a aquéllas que se encuentran sobre árboles; una precisa discusión acerca de la importancia de los líquenes sobre suelo en Australia ha sido desarrollada por Eldrige y Toser [22].

Los estudios que se han realizado acerca de los rangos y patrones de preferencia de los líquenes foliáceos con relación a su forofito (hospedante), fueron estudiados por Lücking [68] en una selva nublada de Costa Rica. Descubrió que en áreas de alta diversidad, particularmente en bosques tropicales lluviosos de tierras bajas, las preferencias de un líquen por un forofito específico son bajas y

Tabla 3. Índices ecológicos para líquenes foliosos aplicados a diversos tipos de vegetación (adaptado de Lücking, 1997, [67]).

Índices ecológicos	Tipo de vegetación
A	Bosque primario
B	Bosque cerrado (primario y secundario antiguo)
C	Bosque cerrado o parcialmente abierto
D	Bosque cerrado a semi-expuesto (márgenes de bosques, vegetación antropogénica con follaje denso)
E	Bosque parcialmente abierto a expuesto (plantaciones, dosel del bosque)
F	Vegetación expuesta
w	Término amplio, desde bosque primario a vegetación expuesta



Figura 3. Base del árbol de mayor altura (algodón de seda) en Trinidad. La presencia sobre el tronco de líquenes indicadores de bosque antiguo, y el conjunto de especies sobre las hojas pueden permitir dilucidar si selvas tropicales que presentan árboles de tal tamaño se encuentran en bosques primarios o secundarios.

cuantitativas más que cualitativas. Es decir, diferentes especies de forofito permiten una cierta variabilidad de especies de líquenes foliáceos, pero en muy pequeña medida muestran diferencias en cuanto a la composición de especies. Los diferentes estadios de diversidad que se observan en un forofito particular, podrían interpretarse como diferentes estados dinámicos o sucesionales. Hay algunas excepciones con respecto a algunos hospedantes, como las palmas. Éstas son forofitos con un contingente de especies líquénicas muy específico. La composición de especies se ve afectada de forma importante por las condiciones medioambientales, particularmente debido a la intensidad de la luz. Lücking [68], en estudios dirigidos a investigar la especificidad de los líquenes epífitos hacia algunos forofitos particulares, encontró en Costa Rica que la composición de especies de estos últimos se ve afectada principalmente por condiciones microclimáticas, en particular la intensidad relativa de la luz.

Algunas familias como *Arthoniaceae*, *Opegraphaceae* y *Trichotheliaceae* son típicas de forofitos del sotobosque, mientras que otras como las *Gomphillaceae* y *Ectolechiaceae* son dominantes sobre forofitos ubicados en áreas de alta luminosidad [68]. Asimismo, el citado autor descubrió que un cambio en las especies de forofitos debido a causas antropogénicas o evolutivas, podría no

afectar a los líquenes foliáceos siempre y cuando la estructura y dinámica del bosque se mantuviera igual.

Kantvilas y Jarman [59] evaluaron el impacto que diferentes técnicas de explotación forestal y regeneración utilizadas en silvicultura tenían sobre líquenes en una selva húmeda de eucalipto, ubicada en Tasmania.

Biodiversidad líquénica en los trópicos

Se tiene muy poco conocimiento acerca de la biodiversidad líquénica en los trópicos, y muchas de sus especies, aún por conocer, podrían ser importantes bioindicadores. Como ejemplo de esto, los trabajos realizados por Homchantara y Coppins [55] en la familia *Thelotrema* en Tailandia y Malasia, demostraron que de 767 especímenes recolectados en el área de estudio, 114 fueron especies diferentes, y 30 especies nuevas para la ciencia. Asimismo, Aptroot y Seaward [3] recolectaron e identificaron 218 especies de líquenes en dos semanas en Hong Kong, realizadas por el primer autor, de entre las cuales 176 se citaban como presentes en Hong Kong por primera vez. También, Aptroot [2] mostró que, en recolecciones intensivas, en las partes aéreas de un solo árbol pueden hallarse un gran número de especies líquénicas. Así, en un ejemplar de *Eleocarpus* en un bosque montano en Papua Nueva Guinea, de un total de 200 especies de ascomicetes recolectadas, 173 especies estaban liquenizadas. Feuerer y col. [28] realizaron estudios de biodiversidad líquénica en Bolivia, de donde sólo se conocían hasta el momento 150 especies. Describieron 60 especies de líquenes nuevas para Bolivia y ocho nuevas para Sudamérica. También Gallo-way [32] estudió la flora líquénica de Chile, comprobando que es una de las más ricas y diversas del mundo debido a la extraordinaria diversidad de hábitats que posee este país. Pignata [81,82] realizó estudios con líquenes como biomonitores de niveles de contaminación atmosférica en las ciudades de Córdoba y Bariloche en Argentina, y observó que los diferentes contaminantes motivaban diferentes respuestas en siete especies de líquenes en Córdoba, y que en Bariloche, a pesar de ser una ciudad pequeña, también se observaban diferencias en la composición de líquenes entre áreas urbanas y periféricas. Ahti [1] realizó una monografía de la familia *Cladoniaceae* para el neotrópico, principalmente en las regiones de Venezuela, Brasil, Guyana y Costa Rica, la cual incluye 183 especies ubicadas en cuatro géneros, de las cuales 30 especies fueron descritas como nuevas para la ciencia. Calvelo [12] realizó claves para 55 especies ubicadas en 21 géneros de la familia *Parmeliaceae* en Patagonia, Tierra del Fuego y las islas del Atlántico Sur en Argentina. Yoshimura [116] trabajó en los aspectos taxonómicos, geográficos y evolutivos del género *Lobaria* en Latinoamérica. Vitikainen [105] revisó el estado nomenclatural y taxonómico de 37 epítetos del género *Peltigera* de taxa neotropicales, y aceptó 11 de éstas; realizó una nueva combinación, y presentó una clave preliminar para el área.

Descubriendo el potencial

El objetivo de este trabajo ha sido dar una idea acerca del potencial de los líquenes como indicadores del estado de salud de los ecosistemas, haciendo énfasis en los trabajos realizados más recientemente y en investigaciones más generales realizadas con anterioridad [44].

En los trópicos, el potencial que tienen los líquenes de ser utilizados en diagnosis rápidas de los ecosistemas, es particularmente importante, ya que se pueden reconocer

patrones o modelos con facilidad. Además, en contra de lo que pudiera parecer, es posible utilizar algunos líquenes sin tener que identificarlos hasta especie. Con la finalidad de su uso como bioindicadores, la discriminación realizada a simple vista o con la ayuda de una lupa de campo puede ser suficiente para dar una impresión general acerca del ambiente. Entonces, ¿por qué hasta ahora no se han utilizado los líquenes más ampliamente como indicadores en el trópico? Aunque como se ha dicho los líquenes hayan sido utilizados como bioindicadores incluso por escolares en numerosos lugares, causa cierta sorpresa lo relativamente poco que se han manejado estas técnicas en las amplias regiones tropicales donde los epifitos son extremadamente abundantes. Los macrolíquenes, foliáceos y fruticulosos, suelen despertar interés ya que son sumamente atractivos y, además, están presentes durante todo el año. Probablemente la razón de su escaso uso se encuentre más en la falta de familiaridad con las técnicas de medida que en el desconocimiento o en la dificultad de las técnicas de identificación, al menos para el grado de precisión que estas técnicas requieren en la monitorización. Este sería un aspecto a considerar para ser incluido en los cursos de formación y aprendizaje en salud ambiental y conservación de hábitats en el trópico [31].

Otra causa sería el escaso número de liquenólogos que trabajan en estas regiones. Resulta de interés el resaltar que casi todos los estudios realizados en regiones tropicales han sido llevados a cabo por liquenólogos extranjeros a estas regiones. Lucking ha realizado cursos en Costa Rica para entrenar a estudiantes y parataxónomos mesoamericanos y sudamericanos (2004, *comunicación personal*).

En la actualidad, en el Reino Unido se integra la información existente acerca de los líquenes con la del resto de la biota, a fin de seleccionar los sitios a los que se debe asignar el estatus de protección medio ambiental [54], un modelo que merece mayor estímulo.

Últimamente, en Europa se ha popularizado el concepto del descenso en los niveles de contaminación, con el objetivo de que los niveles de contaminantes aéreos sean tan bajos como para que salvaguarden incluso a los líquenes más sensibles [26]. A partir de la Convención de Diversidad Biológica, se está dando mayor importancia a monitorizar y asignar un valor conservacionista a los programas de acción de biodiversidad nacional. Como consecuencia, la utilización de los líquenes como bioindicadores debe ser un tópico a considerar seriamente en los países tropicales. La rapidez y bajo coste de los análisis los hacen especialmente atractivos cuando los recursos son escasos. Sin embargo, tan solo mediante investigaciones continuas y entrenamiento, podrán obtenerse los beneficios señalados.

El primer autor agradece a la Unión Internacional de Ciencias Biológicas (IUBS) el facilitar su participación en el simposio acerca de este tema, y a Patricia Taylor-Hawksworth su estímulo para escribir la presentación para su publicación. El trabajo ha sido realizado durante la estancia de Teresa Iturriaga en año sabático en el Departamento de Biología Vegetal II de la Universidad Complutense de Madrid, financiada por la Secretaría de Estado de Educación y Universidades a través del Ministerio de Educación y Cultura, modalidad "Ayudas para Profesores de Universidades e Investigadores Españoles y Extranjeros" de España. Ana Crespo agradece al mismo Ministerio la financiación básica a través del proyecto CGL2004-1848/BOS.

Bibliografía

- Ahti T. The lichen family *Cladoniaceae* in the neotropics. In: Marcelli MP, Seaward MRD (Eds.) *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications*. CETESB. São Paulo, 1998, 109-115.
- Aptroot A. Lichenized and saprobic fungal biodiversity of a single *Elaeocarpus* tree in Papua New Guinea, with the report of 200 species of ascomycetes associated with one tree. *Fungal Diversity* 2001; 6: 1-11.
- Aptroot A, Seaward MRD. *Tropical Bryology Annotated checklist of Hong Kong lichens*. 1999; 17: 57-101.
- Arndt U, Nobel W, Schweizer B. *Bioindikatoren. Möglichkeiten, Grenzen und Neue Erkenntnisse*. Stuttgart, Eugen Ulmer, 1987.
- Barclay-Estrup P. Lichens of *Cocos nucifera* on Caye Caulker, Belize. *Lichenologist* 1992; 24: 249-254.
- Barreno E, Pérez-Ortega S. Líquenes de la Reserva Natural Integral de Muniellos, Asturias. Oviedo, Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructura del Principado de Asturias y KRK ediciones, 2003.
- Bates JW, Farmer AM (Eds.) *Bryophytes and lichens in a changing environment*. Oxford, Oxford Science Publications, 1992.
- Batic F. Bioindication of sulphur dioxide pollution with lichens. En: Kranner I, Beckett RP, Varma AK (Eds.) *Protocols in Lichenology*. Berlin, Springer-Verlag, 2002: 483-503.
- Biazrov LG. Lishajnik i v ekologicheskomo monitoringe (Lichens in ecological monitoring). Moscow, Nauchnyj Mir Publishing 2002.
- Bretschneider S, Marciano V. Utilización de líquenes como indicadores de contaminación por metales pesados y otros agentes en el Valle de Mérida. Resumen. I Congreso Venezolano de Ficología. *Revista Forest Venez* 1995; 1: 35-36.
- Brightman FH, Seaward MRD. Lichens of man-made substrates. In: Seaward MRD (Ed.) *Lichen Ecology*. London, Academic Press, 1977: 253-293.
- Calvelo S. Keys to the genera and species of *Parmeliaceae* S. Lat. From Patagonia, Tierra del Fuego and South Atlantic Islands (Argentina). In: Marcelli MP, Seaward MRD (Eds.) *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications*. São Paulo, CETESB 1998, 117-128.
- Chen S, Wu F, Wu JN. Using lichen communities as SO₂ pollution monitors. *J Na Sci Nanjing Norm Univ* 1989; 12: 77-82.
- Cislaghi C, Nimis PL. Lichens, air pollution and lung cancer. *Nature* 1997; 387: 463-464.
- Coppins AM, Coppins BJ. Indices of ecological continuity for woodland epiphytic lichen habitats in the British Isles. London, British Lichen Society, 2002.
- Coppins BJ, Wolseley P. Lichens of tropical forests. In: Watling R, Frankland JC, Ainsworth AM, Isaac S, Robinson, CH (Eds.) *Tropical Mycology, Vol 2: Micromycetes*. Wallingford, CABI Publishing, 2002: 113-131.
- Crespo A, Bridge PD, Hawksworth DL, Grube M y Cubero OF. Comparison of rDNA genotype frequencies of *Parmelia sulcata* from long established and recolonizing sites following sulphur dioxide amelioration. *Plant Syst Evol* 1999; 217: 177-183.
- Crespo A, Divakar P K, Arguello A, Gasca C, Hawksworth DL. Molecular studies on *Punctelia* species in the Iberian Peninsula, with an emphasis on specimens newly colonizing Madrid. *Lichenologist* 2004; 36: 299-308.
- De Sloover J, Le Blanc F. Mapping of atmospheric pollution on the basis of lichen sensitivity. In: Misra R y Gopal B (Eds.) *Proceedings of the Symposium on recent advances in tropical ecology*. Varanasi, The International Society for Tropical Ecology, 1968: 42-56.
- De Baker AJ. Effects of ammonia emission on epiphytic lichen vegetation. *Acta Bot Neerl* 1989; 38: 337-342.
- Dixon J, Kelly D. A study of Jamaican lichens. In: Davis C (Ed.) *Proceedings of a symposium on environmental studies in Jamaica, 25-26 May 1979*. Mona, University of the West Indies, 1979: 193-200.
- Elridge D, Tozer ML. A practical guide to soil lichens and bryophytes of Australia's dry country. Sydney, Department of Land and water conservation, 1997.
- Estrabou C. Lichen species identification and distribution according tolerance to airborne contamination in the city of Córdoba (Argentina). In: Marcelli MP, Seaward MRD (Eds.) *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications*. São Paulo, CETESB 1998: 65-169.
- Etayo J. Aportación al catálogo de líquenes epítos y hongos liquenícolas de Coiba (Panamá). In: Flora y Fauna del Parque Nacional de Coiba (Panamá). S. Castroviejo Ed. Madrid, Agencia Española de Cooperación Internacional 1997: 205-220.
- Farkas E, Hawksworth DL. New foliicolous lichen records from two different habitats in Trinidad. *Caribbean J Sci* 2004; 40: 399-401.
- Farmer A. Reducing the impact of air pollution on the natural environment. Peterborough, Joint Nature Conservation Committee, 1995.
- Ferry BW, Baddeley MS, Hawksworth D. *Air pollution and lichens*. London, Athlone Press of the University of London, 1973.
- Feuerer T, Ahti, T, Vitikainen O. Lichenological investigations in Bolivia. In: Marcelli MP, Seaward MRD (Eds.) *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications*. São Paulo, CETESB 1998: 71-86.
- Filho LX, Toledo C. *Manual de líquenologia brasileiro*. Recife, Universidad Federal de Pernambuco, 1976.
- Galloway DJ. Lichens of Laguna San Rafael, Parque Nacional Laguna San Rafael, southern Chile: indicators of environmental change. *Global Ecol Biog Let* 1992: 37-45.
- Galloway DJ. Lichens in southern hemisphere temperate rainforest and their role in maintenance of biodiversity. In: Allsopp D, Colwell RR, Hawksworth DL (Eds.) *Microbial diversity and ecosystem function*. Wallingford, CAB International 1995: 125-135.
- Galloway DJ. The lichens of Chile: present knowledge and future prospects. In: Marcelli MP, Seaward MRD (Eds.) *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications*. São Paulo, CETESB 1998: 87-100.
- García MFF, Guerrero D, Marcelli MP, Saiki M. Aplicação didática de um estudo sobre indicadores de poluição na cidade de Guarulhos, Estado de São Paulo, Brasil. In: Marcelli MP, Salino A, Ribeiro CH (Eds.) *Recollecting Vaino y GLAL-3, Catas Atlas*, International Association for Lichenology, 1997.
- Garty J. Biomonitoring heavy metal pollution with lichens. In: Kranner I, Beckett RP, Varma AK (Eds.) *Protocols in Lichenology*. Berlin, Springer-Verlag, 2002: 458-482.
- Gilbert OL. A new alkaline dust effect on epiphytic lichens. *Lichenologist* 1976, 8: 173-178.
- Gilbert OL, Giavarini VJ. The lichen vegetation of acid watercourses in England. *Lichenologist* 1997, 29: 347-367.
- Gilbert OL. *Lichens*. London, Harper Collins Publishers, 2000.
- Gordon CA, Herrera R, Hutchinson, TC. The use of a common epiphytic lichen as a bioindicator of atmospheric inputs to two Venezuelan cloud forests. *Jour Trop Ecol* 1996, 11: 1-26.
- Gregory KJ. Lichens and the determination of river channel capacity. *Earth Surface Processes* 1976, 1: 273-285.
- Hawksworth DL. Lichens as litmus for air pollution: a historical review. *Int J Environ Studies* 1971, 1: 281-296.
- Hawksworth DL. *Mapping Studies*. In: Ferry BW, Baddeley MS, Hawksworth DL (Eds.) *Air pollution and lichens*. London, Athlone Press of the University of London, 1973.
- Hawksworth DL. The variety of fungal-algal symbioses, their evolutionary significance, and the nature of lichens. *J Linn Soc Bot* 1988, 96: 3-20.
- Hawksworth DL. The long-term effect of air pollutants on lichen communities in Europe and North America. In: Woodwell GM (Ed.) *The earth in transition: patterns and processes of biotic impoverishment*. Cambridge, Cambridge University Press, 1990: 45-64.
- Hawksworth DL. Litmus tests for ecosystem health: the potential of bioindicators in the monitoring of biodiversity. In: Swaminathan MS, Jana WS (Eds.) *Biodiversity: Implications for global food security*. Madras, Macmillan India, 1992: 184-204.
- Hawksworth DL. Lichens (lichen-forming fungi) in Buckingham Palace Garden. *London Naturalist* 1999; 78(Suppl.): 15-21.
- Hawksworth DL. Freshwater and marine lichen-forming fungi. *Fungal Diversity* 2000; 5: 1-7.
- Hawksworth DL. Bioindication: calibrated scales and their utility. In: Nimis PL, Scheidegger C, Wolseley P (Eds.) *Monitoring with lichens-Monitoring lichens*. NATO Science Series IV, Earth and Environmental Sciences vol. 7. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2002: 367-371.
- Hawksworth, DL, McManus PM. Lichen recolonization in London under conditions of rapidly falling sulphur dioxide, and the concept of zone skipping. *J Linn Soc Bot* 1989; 100: 99-109.
- Hawksworth DL, Rose F. Qualitative scale for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. *Nature* 1976; 227: 145-148.
- Hawksworth DL, Rose F. Lichens as pollution monitors. *Institute of Biology's Studies in Biology 66*. London, Edward Arnold Publishers Ltd., 1976.
- Hawksworth DL, Weng YX. Lichens on camphor trees along an air pollution gradient in Hangzhou (Zhejiang Province). *Forest Research, Chinese Academy of Forestry* 1990; 3: 514-517.
- Heinrich G, Remele K. Biomonitoring radionuclide deposition with lichens. In: Kranner I, Beckett RP, Varma AK (Eds.) *Protocols in Lichenology*. Berlin, Springer-Verlag, 2002: 425-457.

53. Herzig R, Urech M. Flechten alid Bioindikatoren. *Bibliotheca Lichenologica* 1991; 43: 1-283. 30: 1-297. Berlin, Stuttgart, J. Cramer.
54. Hodgetts NG. Guidelines for selection of biological SSSIs non-vascular plants. Peterborough, Joint Nature Conservation Committee, 1992.
55. Homchantara N, Coppins BJ. New species of the lichen family *Thelotrema* in SE Asia. *Lichenologist* 2002; 34: 113-140.
56. Honegger R. The lichen symbiosis-what is so spectacular about it? *Lichenologist* 1998; 30: 193-212.
57. Huckaby LS. Lichens as bioindicators of air quality. USDA Forest Service, General Technical Report No. RM-224. Fort Collins, Rocky Mountains Forest and Range Experiment Station, 1993.
58. Innes, JL. Lichenometry. *Progress in physical geography* 1985; 9: 187-254.
59. Kantvilas G, Jarman SJ. Using lichens and bryophytes to evaluate the effects of silvicultural practices in Tasmanian wet *Eucalyptus* forest. In: Nimis PL, Scheidegger C, Wolseley P (Eds.) *Monitoring with lichens—monitoring lichens*. NATO Science Series IV, Earth and Environmental Sciences vol. 7. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2002: 367-371.
60. Lawrey JD. Lichens as monitors of pollutant elements at permanent sites in Maryland and Virginia. *Bryologist* 1993; 96: 339-341.
61. Le Blanc F, De Sloover J. Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Can J Bot* 1976; 48: 1485-1496.
62. Levin AG, Pignata ML. *Ramalina ecklonii* as a bioindicator of atmospheric pollution in Argentina. *Can J Bot* 1995; 73: 1196-1202.
63. Li TQ. Studies on monitoring role of lichens to air-borne fluoride. The relationship between air-borne fluoride and lichen eco-botany. *Journal of Beijing Forestry College* 1979; 1: 127-137.
64. Llimona X. Fongs i líquens. En: Llimona X (Ed.) *Història Natural dels Països Catalans*. Vol. 5. Barcelona, Enciclopèdia Catalana, 1991.
65. Lücking R. Follicolous lichens. A contribution to the lichen flora of Costa Rica. *Central America*. Nova Hedwigia 1992; 104: 1-179.
66. Lücking R. Biodiversity and conservation of foliicolous lichens in Costa Rica. *Mitteilungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft* 1995; 70: 63-92.
67. Lücking R. The use of foliicolous lichens as bioindicators in the tropics with special reference to the microclimate. *Abstracta Botanica* 1997; 21: 99-116.
68. Lücking R. Ecology of foliicolous lichens at the "Botarrama" trail (Costa Rica) a neotropical rain forest. III. Phorophyte ranges and patterns of phorophyte preferences. *Phyton* 1998; 38: 195-219.
69. Marcelli MP. Aspects of the foliose lichen flora of the southern-central coast of São Paulo State, Brazil. In: Galloway DJ (Ed.) *Tropical Lichens: their systematics, conservation, and ecology*. Oxford, Clarendon Press, 1991: 151-176.
70. Marcelli MP, Seaward MRD (Eds.) *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications*. São Paulo, CETESB, 1998.
71. Mohan MS, Hariharan GN. Lichen distribution pattern in Pichavaram. A preliminary study to indicate forest disturbance in the mangroves of South India. In: Mukerji KG, Chamola BP, Upreti DK, Upadhyay RK (Eds.) *Biology of Lichens*. New Dehli, Aravali Books International, 1999: 283-296.
72. Misty J. Corticolous lichens as potential bioindicators of fire history: a study in the Cerrado of the Distrito Federal, Central Brazil. *Journal of Biogeography* 1998; 25: 409-441.
73. Misty J. A preliminary lichen fire history (LFH) key for the Cerrado of the Distrito Federal, Central Brazil. *J Biogeography* 1998; 25: 443-452.
74. Nash TH III (Ed.) *Lichen Biology*. Cambridge, Cambridge University Press, 1996.
75. Nash TH III, Wirth V (Eds.) *Lichens, bryophytes and air quality*. *Bibl Lichenol* 1988; 30: 1-297.
76. Nayangababo JT. Lichens as monitors of aerial heavy metal pollution in and around Kampala. *Bull Environ Contam Toxicol* 1987; 38: 91-95.
77. Nimis PL, Castello M, Perotti M. Lichens as biomonitors of sulphur dioxide pollution in La Spezia (northern Italy). *Lichenologist* 1990; 22: 333-344.
78. Nimis PL, Scheidegger C, Wolseley P (Eds.) *Monitoring with lichens—Monitoring lichens*. NATO Science Series IV, Earth and Environmental Sciences vol. 7. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2002.
79. Nylander W. Les lichens du Jardin de Luxembourg. *Bull Soc Bot France* 1866; 13: 364-372.
80. Osorio H, Fleig M. Contribution to the lichen flora of Brazil. 16. Lichens from the vicinity of Rio Grande city, Rio Grande do Sul state. *Comunicaciones Botánicas del Museo de Historia Natural de Montevideo* 1985; 4: 1-7.
81. Pignata ML. Estudios sobre líquenes y contaminación atmosférica en Argentina. In: Marcelli MP, Salino A, Ribeiro CH (Eds.) *Recollecting Vainio / GLAL-3*. *Catas Altas*, International Association for Lichenology 1997: 15-17.
82. Pignata ML. Studies on lichens and atmospheric pollution in Argentina. In: Marcelli MP, Seaward MRD (Eds.) *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications*. São Paulo, CETESB 1998: 160-164.
83. Pérez CP, López MC, López ME. *Guía dos líquens de Galicia*. Coruña, Baia Edicions, 2003.
84. Purvis OW. Interactions of lichens with metals. *Sci. Progr.* 1996; 79: 283-309.
85. Quilhot W, Fernández E, Rubio C, Goddard M, Hidalgo ME. Lichen secondary products and their importance in environmental studies. In: Marcelli MP, Seaward MRD (Eds.) *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications*. São Paulo, CETESB, 1998: 171-179.
86. Richardson DHS. Pollution monitoring with lichens. Slough, Richmond Publishing, 1992.
87. Richardson DHS. War in the world of lichens: parasitism and symbiosis as exemplified by lichens and lichenicolous fungi. *Mycol Res* 1999; 103: 641-650.
88. Rose F. Temperate forest management: its effects on bryophyte and lichen floras and habitats. In: Bates JW, Farmer AM (Eds.) *Bryophytes and lichens in a changing environment*. Oxford, Oxford Science Publications, 1992: 211-233.
89. Saipunkaew W, Wolseley P, Chimonides J, Boonpragob K. Lichens as monitors of urban pollution in northern Thailand. In: Randlane T, Saag A (Eds.) *IAL5 book of abstracts: Lichens in focus*. Tartu, University of Tartu, 2004: 67-68.
90. Sancho LG, Pintado A. Evidence of high annual growth rate for lichens in the maritime Atlantic. *Polar Biology* 2004; 27: 312-319.
91. Scott GD. Studies of the lichen symbiosis: 3. The water relations of lichens on granite kopies in central Africa. *Lichenologist* 1967; 3: 368-385.
92. Seaward MRD. Lichens and sulphur dioxide air pollution: field studies. *Environ Rev* 1993; 1: 73-91.
93. Seaward MRD. Urban deserts bloom: a lichen renaissance. *Bibl Lichenol* 1997; 67: 297-309.
94. Seaward MRW, Helsop JA, Green D, Bylinska EA. Recent levels of radionuclides in lichens from southwest Poland with particular reference to Cs-134 and Cs-137. *J Environ Radioactiv* 1988; 7: 123-129.
95. Steubing L, Jagger HJ. Monitoring air pollutants by plants. Methods and problems. The Hague, W. Junk, 1982.
96. Stork NE, Samways MJ. *Inventing and Monitoring*. In: Heywood VH (Ed.) *Global biodiversity assessment*. Cambridge, Cambridge University Press, 1995: 453-543.
97. Sugiyama K, Kurokawa S, Okada G. Studies on lichens as a bioindicator of air pollution. Correlation of *Parmelia tinctorum* with SO₂ air pollution. *Jap J Ecol* 1976; 26: 209-212.
98. Supartinah N. The lichens as biological indicators of air pollution at Kamojang. Abstracts 9th International Symposium as Bioindicators. 24-27 November. Serdang, Universitas Putra, 1997: 51.
99. Thrower SL. Clean air and lichens. Hong Kong, Chinese University of Hong Kong, 1978.
100. Thrower SL. Air pollution and lichens in Hong Kong. *Lichenologist* 1980; 12: 305-311.
101. Thüs H. Taxonomie, verbreitung und ökologie silicoler sü?wasserflechten im außeralpinen Mitteleuropa. *Bibliotheca Lichenologica* 2002; 83: 1-158. 30: 1-297. Berlin, Stuttgart, J. Cramer.
102. Umaña L, Sipman H. *Líquenes de Costa Rica*. Instituto Nacional de Biodiversidad (INBio), Litografía e Imprenta LIL, S.A., San José, Costa Rica, 2002.
103. Vareschi, V. La influencia de los bosques y parques sobre el aire de la ciudad de Caracas. *Acta Ci Venez* 1953; 4: 89-95.
104. Vareschi V, Moreno, E. La contaminación en Caracas en los años 1953 y 1973. *Bol Soc Venez Ci Nat* 1973; 30: 387-444.
105. Vitikainen O. Taxonomic notes on neotropical species of *Peltigera*. In: Marcelli MP, Seaward MRD (Eds.) *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications*. CETESB. São Paulo, 1998: 135-139.
106. Wilson EO. *Biodiversity*. Washington DC, National Academy Press, 1988.
107. Wolseley PA. Observations on the composition and distribution of the *Lobarion* in forests of south east Asia. In: Galloway DJ (Ed.) *Tropical lichens: their systematics, conservation, and ecology*. Oxford, Clarendon Press, 1991: 217-243.

108. Wolseley PA. Using corticolous lichens of tropical forests to assess environmental changes. In: Nimis PL, Scheidegger C, Wolseley P (Eds.) *Monitoring with lichens-Monitoring lichens*. NATO Science Series IV, Earth and Environmental Sciences vol. 7. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2002: 367-371.
109. Wolseley PA, Aguirre-Hudson B. Lichens as indicators of environmental change in the tropical forests of Thailand. *Global Ecology and Biogeography Letters* 1991; 1: 170-175.
110. Wolseley PA, Aguirre-Hudson B. Fire in tropical dry forests: corticolous lichens as indicators of recent ecological changes in Thailand. *J Biogeography* 1997; 24: 345-362.
111. Wolseley PA, Aguirre-Hudson B. The ecology and distribution of lichens in tropical deciduous and evergreen forests of northern Thailand. *J Biogeography* 1997; 24: 327-343.
112. Wolseley PA, Moncreiff C, Aguirre-Hudson B. Lichens as indicators of environmental stability and change in the tropical forests of Thailand. *Global Ecol. Biogeographical Letters* 1994; 4: 116-123.
113. Wu JH, Ka KH, Park H. Air pollution effects on soil chemical properties, estate. *J Korean Forestry Society* 1995; 84: 178-186.
114. Wu JL, Tang HA, Hao YH. A preliminary study on absorption and accumulation of radioactivity in lichens. *Mycosystema* 1988; 7: 183-188.
115. Xiang T, Cen S, Wu JN. 1989. A preliminary assessment of atmospheric quality in Helmoing area (Nanjing) by using lichens and bryophytes. *J Nanjing Normal University* 1989; 12: 69-77.
116. Yoshimura I. *Lobaría* in Latin America: taxonomic, geographical and evolutionary aspects. In: Marcelli MP, Seaward MRD (Eds.) *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications*. CETESB. São Paulo, 1998: 129-134.