



**FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE**

TRABAJO FIN DE GRADO

**LÍQUENES COMO BIONDICADORES
DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE**

Autor: Alberto Lillo Sánchez

Tutor: Dr. Leopoldo García

Sancho Convocatoria: Junio 2018

RESUMEN

Un bioindicador es un sistema biológico u organismo vivo sensible a las variaciones en la calidad ambiental, en este caso a la calidad del aire.

Los líquenes son especies que nos permiten determinar características del medio en el que se encuentra.

Algunas características que favorecen el uso de los líquenes como bioindicadores son: Distribución amplia, escasa movilidad, ciclo de vida largo, muestreo fácil, bajo coste y capacidad para acumular contaminantes atmosféricos.

Algunos de los contaminantes atmosféricos que afectan a estos organismos son entre otros, los compuestos de nitrógeno, los metales, fluoruros, polvo alcalino y dióxido de azufre.

En este trabajo se pretende demostrar la relación inversa que existe entre la diversidad de líquenes y la calidad del aire en lugares más o menos afectados por la contaminación industrial o urbana y el efecto sobre la fisiología de los líquenes de los principales contaminantes.

ABSTRACT

A bioindicator is a biological system or a living organism sensitive to the variations in the environmental quality, in this case, sensitive to the air quality.

Lichens are species that allow us to determine characteristics of the environment in which it is found.

Some characteristics that favor the use of lichens as bioindicators are: wide distribution, low mobility, long life cycle, easy sampling, low cost and capacity to accumulate atmospheric pollutants.

Some of the air pollutants that affect these organisms are, among others, nitrogen compounds, metals, fluorides, alkaline powder and sulfur dioxide.

In this piece of work, we pretend to demonstrate the inverse relationship that exists between the diversity of lichens and the air quality in places more or less affected by the industrial or urban pollution and the effect on the physiology of the lichens of the main pollutants.

INTRODUCCIÓN

Los líquenes no son organismos individuales, sino asociaciones mutualistas entre hongos (micobionte) y algas o cianobacterias (fotobionte) que pueden funcionar en la naturaleza como una unidad. Las hifas del hongo rodean las células del fotobionte y la relación entre esta pareja es lo que determina el tipo de desarrollo que se producirá, esto es, bien en forma de costra (crustáceo), en forma de hoja (foliáceo), o en forma de pequeño arbusto (fruticuloso). (1)

Pues bien, los líquenes son organismos muy resistentes a los extremos térmicos e hídricos debido a que no necesitan grandes cantidades de agua o nutrientes. El agua accede al talo penetrando por toda su superficie, pero no dispone de ningún tipo de órgano regulador o impermeabilizador, por lo que todo lo que hay disuelto en el agua, a excepción de partículas grandes, pasa al interior del liquen. Por esta razón, las especies que no están adaptadas al agua contaminada (eutrofizada) o a ciertas concentraciones de contaminantes, no se adaptan a ambientes urbanos contaminados, sino que se adaptan a cualquier tipo de superficie, ya sea corteza de árboles, construcciones, o suelos. Por otro lado, llevan a cabo la fotosíntesis y son seres autótrofos, por lo tanto, su funcionamiento depende de la luz.

La reproducción de los líquenes, al tratarse de una simbiosis entre dos reinos diferentes, tiene características particulares, pues el alga se reproduce por medio de gemación o fisión binaria, mientras que el hongo se reproduce sexualmente por medio de esporas o asexualmente por fragmentación del talo.

Por otro lado, la fase sexual está supeditada al micobionte desarrollando estructuras generalmente en forma de copa, típico de Ascomicetes, de esta manera las esporas (ascosporas) tendrán que encontrar un componente fotosintético para sobrevivir, por el contrario el alga bajo condiciones óptimas puede vivir y desarrollarse libremente sin la presencia del hongo. (11)

Se conocen hasta casi 40 géneros diferentes de algas y cianobacterias como fotobiontes en líquenes, entre ellos, podemos señalar los géneros *Trebouxia*, *Nostoc*, y *Trentepohlia*. El fotobionte es un autótrofo que puede producir sus propios compuestos, pero para ello, necesita tener a su disposición sales minerales, como óxidos de silicio o carbonatos, del mismo modo que tendrá que disponer de agua para sus procesos fisiológicos. Por otro lado, el hongo micobionte tomará los productos metabólicos del

agua como proteínas, vitaminas y azúcares, proporcionándole protección contra la radiación solar y la desecación, al formar una especie de estructura de aspecto gelatinoso que la rodea y reduciendo de este modo los extremos térmicos.

Asimismo, el hongo provee al fotobionte los precursores metabólicos como las sales inorgánicas, dióxido de carbono de su respiración y el agua que generalmente proviene de la lluvia o el rocío. (21)

Según la morfología otorgada por el hongo, podemos diferenciar entre los siguientes tipos de líquenes:

- Crustáceos, que poseen la zona o córtex inferior fuertemente adherido al sustrato y en casi toda la superficie.
- Foliáceos, los cuales tienen forma de hoja o lámina y el córtex inferior adherido solo por algunas partes al sustrato.
- Fruticulosos, talos ramificados con forma de pequeños arbustillos, su parte adherida solo está supeditada a unos pocos mm en el disco de fijación. (11)

Por otra parte, existen diversas razones por las que los líquenes son utilizados como bioindicadores de manera exitosa, entre ellas:

- No poseen cutícula protectora y absorben nutrientes y contaminantes a través de su superficie.
- Su naturaleza simbiótica, ya que cualquiera de los dos componentes de la simbiosis se viera afectado morirían ambos.
- Son relativamente longevos, permaneciendo expuestos a la contaminación durante largos periodos, por lo que dan una imagen de estados crónicos y no variaciones puntuales del medio ambiente.
- Organismos perennes que pueden ser muestreados durante todo el año.
- Están ampliamente distribuidos, encontrándose en la mayoría de ecosistemas terrestres, hasta en centros urbanos. Crecen en todo tipo de sustratos tanto inertes como orgánicos. (1)

Esta serie de características identificativas de los líquenes permiten distinguirlos de otros organismos parecidos, pues no existen otros que posean tal sensibilidad, lo que los convierten en unos grandes bioindicadores de la contaminación ambiental, el cambio climático y la continuidad biológica.

Los líquenes pueden usarse tanto como bioindicadores como biomarcadores, de los siguientes modos:

- Mediante el muestreo de las diferentes especies de líquenes y midiendo la concentración de especies contaminantes en el talo.
- Trasplantando el liquen desde una zona contaminada a otra también contaminada, y ver de este modo las diferencias morfológicas y su nivel de concentración de contaminantes.
- Cartografiando todas las especies presentes en un área determinada.

Sin embargo, Sigal (1988) afirma que los líquenes pueden ser útiles como bioindicadores, pero no como biomonitores, es decir, presentan síntomas de lesión cuando se exponen a contaminantes fitotóxicos, pero no permiten saber las concentraciones exactas de estos contaminantes. (9)

Por bioindicador, entendemos organismo o sistema biológico sensible a las variaciones en determinados factores ambientales, en el caso de los líquenes, a la calidad del aire. Pues, en cuanto se produce una alteración en su entorno estos organismos desarrollan una determinada respuesta, como puede ser el hecho de cambiar sus funciones vitales o su composición química, desaparecer, o incluso llegar a acumular el agente causante de este cambio (bioacumuladores).

Aunque en el lenguaje común, bioindicador y biomonitor son sinónimos, para la comunidad científica esto no es así, pues mientras que los bioindicadores revelan cualitativamente las respuestas a los contaminantes ambientales; los biomonitores determinan cuantitativamente las mismas.

Igualmente, los bioindicadores presentan numerosas ventajas frente a los métodos tradicionales, ya que por ejemplo se encuentran en todo momento en su hábitat, mientras que por el contrario, los equipos de medición no, por lo que si en algún momento, por muy corto que sea, tiene lugar algún hecho que pueda afectar, los indicadores biológicos lo detectarán, mientras que los equipos de análisis no. Por otra parte, ofrecen una referencia fundamental sobre el impacto biológico de la contaminación.

Otra ventaja sería que los contaminantes en muchas ocasiones se encuentran en concentraciones tan bajas que se necesitan equipos de análisis con una alta precisión y alto coste, mientras que los bioindicadores lo detectarían sin asumir tales costes.

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.

Antecedentes

Los primeros indicios de la sensibilidad de los líquenes como bioindicadores constan de finales del siglo XVIII, cuando Nylander en 1866, tras estudiar la flora líquénica del Jardín de Luxemburgo, en París, constatan su sensibilidad y proponen su utilización como bioindicadores de la contaminación del aire. (2)

En 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. (1)

Más adelante, en 1970, en un estudio mucho más exhaustivo realizado por Hawksworth & Rose en Londres constató también la desaparición de algunas especies. Posteriormente fueron muchos los estudios llevados a cabo, los cuales sugerían que se trataba de organismos muy sensibles y que pueden utilizarse como bioindicadores de la calidad del aire, como se recoge en varias revisiones de Richardson (1988), Fields (1988) y Nash & Gries (1991). Además, se han publicado más de 2000 trabajos sobre este tema, así como una serie acerca de literatura líquénica publicada en "The Lichenologist" (1974-2000).

En el caso de nuestro país, los líquenes se utilizaron por primera vez en España cartografiando áreas de isocontaminación en la ciudad de Madrid mediante análisis cuantitativos de las comunidades de líquenes epífitos. Más tarde, por medio de técnicas similares se abordó el establecimiento de una red de valoración atmosférica para las proximidades de la central térmica de Meirama en La Coruña, la ciudad de Sabadell, la de Avilés, el parque seminatural de la casa de campo de Madrid, el núcleo urbano de Vigo y la zona industrial de Ponferrada.

Más recientemente se han llevado a cabo estudios en diferentes lugares. Por ejemplo, en Los Pirineos, se realizó uno acerca de los líquenes como biomonitores de hidrocarburos aromáticos policíclicos (12); otro tuvo lugar en el Parque Natural de la Font Roja en Alicante (2); en Valencia, se estudiaron los líquenes como bioacumuladores de metales (26); y también, se llevó a cabo otro estudio en Pontevedra. (28)

Contaminación del aire

En cuanto a la contaminación del aire, la Organización Mundial de la Salud (OMS) la define como el aire contaminado en cuya composición existen una o varias sustancias extrañas, en cantidades y durante un periodo de tiempo las cuales pueden resultar nocivas para el hombre, los animales, las plantas o la tierra.

Podemos clasificar los contaminantes según su origen, haciendo una diferencia entre contaminantes primarios y secundarios:

En cuanto a los contaminantes primarios, hacen referencia a aquellos que se emiten a la atmósfera directamente de la fuente y mantiene la misma forma química. Pueden ser gaseosos o particulados y son: dióxido y monóxido de carbono, de azufre, de nitrógeno, y compuestos halogenados, a los que se pueden añadir los compuestos orgánicos volátiles.

En lo que a contaminantes secundarios se refiere, son aquellos compuestos que se forman en la atmósfera a partir de sus propios elementos sumados a contaminantes primarios. Entre ellos, destacan los oxidantes fotoquímicos, como los NO_x o el ozono, a los que se pueden sumar, los ácidos nítricos y sulfúricos originados de compuestos oxidados de nitrógeno y azufre que reaccionan con la humedad ambiente. (11)

No obstante, estos contaminantes pueden causar una serie de problemas en la Tierra, como los siguientes:

-El aumento del efecto invernadero:

Debido al aumento de las concentraciones atmosféricas mundiales de dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno, originados principalmente por la actividad humana, se produce como consecuencia un aumento de la temperatura del planeta, provocando entre otras muchas consecuencias negativas, el deshielo de los glaciares.

-La lluvia ácida:

El pH de la lluvia oscila entre 5 y 5,7. Sin embargo, el aumento de contaminantes químicos atmosféricos como óxidos de nitrógeno y óxidos de sulfuro junto al incremento del dióxido de carbono, contribuye a que este pH disminuya más, lo cual, al reaccionar con el vapor de agua, da lugar a deposiciones ácidas precipitando de forma húmeda o seca en aguas o suelos, así como corroyendo por oxidación, construcciones y monumentos. Una de las peores consecuencias de la lluvia ácida es el impacto negativo que produce en la vegetación, quemando y diluyendo la capa protectora de la superficie expuesta de las hojas y adentrándose en el interior de la misma desprovista de protección.

-Ozono troposférico:

Es el principal componente del smog fotoquímico, provoca envejecimiento del tejido epitelial, tos sibilancia, dolores pectorales debido a su alta capacidad oxidativa. (11)

TABLA 2
Principales contaminantes químicos y efectos ambientales

Contaminante	Efectos ambientales	Efectos en la salud*
Ozono (O ₃)	Daña la vegetación	Lesiones pulmonares Irritación de los ojos Problemas respiratorios
Dióxido de Azufre (SO ₂)	Causa lluvia ácida Mata la vida acuática Daña los bosques Deteriora edificios y monumentos Forma smog fotoquímico	Irritación de los ojos Lesiones pulmonares Infecciones en tracto respiratorio Bronco-espasmo
Óxido de Nitrógeno (NOX)	Forma lluvia ácida Deteriora los edificios y monumentos Daña los bosques Forma smog fotoquímico	Lesiones pulmonares Irritación ocular Infección de vías respiratorias Exacerbación del asma
Monóxido de Carbono (CO)	Forma smog fotoquímico	Reduce el transporte de O ₂ sanguíneo Dolores de cabeza Menor claridad mental Náuseas y vómitos Fatiga Lesiones cardíacas Muerte

3. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo de fin de grado es llevar a cabo una revisión bibliográfica de trabajos seleccionados sobre la importancia que pueden llegar a tener los líquenes como bioindicadores de la contaminación atmosférica.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha llevado a cabo una búsqueda bibliográfica de publicaciones científicas relacionadas con los líquenes como bioindicadores de la contaminación, utilizando bases de datos como ScienceDirect y PubMed, filtrando la búsqueda por palabras como "lichens", "pollution", "heavy metals", "sulfur dioxide", "nitrogen oxide".

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Existe una gran cantidad de trabajos acerca del uso de los líquenes como bioindicadores de varios tipos de contaminación ambiental, en los cuales se ha podido comprobar la vital importancia que tienen a la hora de detectar altos niveles de contaminantes como dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, metales pesados.

De todos los líquenes, se pueden destacar los epifitos, foliosos y fruticulosos ya que dependen, todavía en un mayor grado, de los factores atmosféricos, debido a que su unión al sustrato es menos pronunciada que en el caso de los crustáceos.

Han sido varios, los autores que iniciaron el mapeo de las especies liquénicas 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 liquénicas o por la estructura de los talos. Detectaron especies que eran más tolerantes en las regiones templadas europeas como *Lecanora conizaeoides*, *Scoliciosporum chlorococcum*, *Amandinea punctata* o *Phaeophyscia orbicularis*), al tiempo que *Lobaria pulmonaria*, *Lobaria amplissima* o especies pertenecientes a *Usnea* son consideradas las más sensibles. (1)

A mediados del siglo XIX, empezó a verificarse la correlación entre las comunidades de líquenes sobre amplias áreas geográficas y la concentración de los contaminantes con

estas, Bretschneider y Marcano en Venezuela utilizaron líquenes como indicadores de contaminación causada por metales pesados y otros agentes en el Valle de Mérida.(15)

Estrabou en 1998, estudió las diferencias en la flora liquénica y el porcentaje de su recubrimiento sobre troncos en cuatro zonas de la ciudad de Córdoba, Argentina, con el objetivo de establecer un sistema de monitoreo en toda la ciudad. Se encontraron 29 especies en el área control mientras que en la zona urbana no hubo ninguna especie. A los 7 años de monitoreo encontró que las especies más sensibles eran *Ramalina eckloni* y *Usnea sp.* *Parmotrema reticulatum* y *Punctelia hypoleucites* eran especies tolerantes, mientras que *Phycia undulata*, *Hyperphycia variabilia* y *Hyperphycia endochrysea* eran resistentes. (22)

5.1 Índice de pureza atmosférica

Se trata de una señal para medir la diversidad de especies. Se utiliza para obtener información cuantitativa, es decir, saber el número de especies que existen o no, dependiendo de la contaminación que haya en la zona.

Se basa en sumar la frecuencia de aparición en todas las especies presentes e indicar indirectamente, la cobertura liquénica en el área del muestreo y directamente, la diversidad de especies.

Determinación de IPA

IPA (árbol) = sumatoria de la frecuencia de cada especie.

IPA (área) = promedio de los valores de IPA árbol de cada área.

Un valor de IPA alto quiere decir que existe una gran diversidad de especies, mientras que por el contrario, un IPA bajo significará una baja diversidad de especies.

5.2 Líquenes y dióxido de azufre

Se ha comprobado que los compuestos de azufre dañan gravemente los líquenes. El dióxido de azufre (SO₂) de la atmósfera penetra directamente en el talo liquénico en forma gaseosa.

Otros compuestos como los iones sulfato lo hacen disueltos en el agua de lluvia. En el talo se concentran y de esta forma desciende el pH del medio en el que crece el ficobionte, que, en definitiva, es quien se ve más afectado por la contaminación.

Concentraciones de 0,035 ppm de SO₂ en la atmósfera pueden llegar a ser 1000 veces superiores en los talos liquénicos. En medio ácido, el SO₂ se disuelve fácilmente interfiriendo en el transporte de electrones del NADP⁺ y, por tanto, incidiendo negativamente en la fotosíntesis. A valores de pH bajos (3-4,5), las clorofilas se oxidan irreversiblemente, mientras que a valores más altos, no se degradan, a no ser que la concentración de SO₂ sea muy elevada. De igual modo, se ve afectada la respiración de ambos simbioses por los compuestos azufrados, pues el descenso en la respuesta fotosintética o respiratoria es del 20 al 50% durante seis-ocho semanas, mientras que la bajada de actividad nitrogenosa es mucho más rápida y drástica, del orden del 80 al 90% en dos semanas de exposición al contaminante. (23)

Estas alteraciones se traducen a nivel morfológico en variaciones de la estructura del talo, necrosis de tejidos, proliferación de soredios como formas de defensa frente a la contaminación, cambio de color y aparición de manchas blanquecinas, secreción de depósitos céreos, etc. A nivel estructural se observan plasmólisis celular y alteraciones en los tilacoides.

En Inglaterra y Gales se realizaron mapas de 11 zonas, encontrándose correlaciones con los niveles de dióxido de azufre pero no así con los niveles de humo. (13)

En Asia la primera correlación entre un líquen y el dióxido de azufre fue realizada con *Parmotrema ticntorum* sobre lapidas en 5 ciudades de Japón. (14)

En 1989, al dejar de funcionar una central térmica en Londres, se produjo una rápida colonización de líquenes, por ejemplo en 1964 en los Jardines del Palacio de Buckingham tenían tan solo dos especies de líquenes en 1964 mientras que 30 años después presentaban 39 especies. Lo que evidenció que al ir descendiendo los niveles de contaminación las especies más tolerantes aparecen en primer lugar y sucesivamente las más sensibles provocando una mejora del aire. (16)

5.3 Compuestos de nitrógeno en los líquenes

Los efectos fisiológicos sobre el líquen al exponerlo a óxidos de nitrógeno son similares a los del dióxido de azufre, ya que un nivel anual de 564 ug/m³ o mayor, puede acabar en decoloración, deformación e incluso, en la muerte del líquen.

Un estudio realizado por De Baker, mostró que la vegetación de líquenes epifitos era muy diferente de una zona agrícola a una zona rural. En los robles había especies

fundamentalmente acidófilas mientras que en la zona agrícola nitrofilas. El amoníaco puede afectar a los líquenes de dos maneras, o incrementando el pH de la corteza o aumentando la concentración de amonio. Este aumento de pH, es perjudicial para las especies acidófilas mientras que mejoran para especies nitrófilas. (24)

Siguiendo en la misma línea, Frati L. & Santoni S. en 2007, llevaron a cabo un estudio en los alrededores de una granja porcina en Italia, midiendo la diversidad de líquenes epifitos a distintas distancias de la granja, lo que mostró que el amoníaco había descendido drásticamente a medida que se alejaban de la granja.

Se encontraron un total de veintisiete especies de líquenes epifitos, dieciséis de las cuales fueron nitrófilas (las más importantes fueron *Hyperphyscia aglutinata*, *Phaeophyscia hirsuta*, *Physcia adscendens*) y 3 estrictamente nitrofilas (*Phaeophyscia orbicularis*, *Physconia grisea*).

La especie que más ponía de manifiesto la contaminación de NH_3 fue la *Physconia grisea*, la cual se encontraba con menos frecuencia a medida que nos alejamos de la granja, mientras que se correlacionó positivamente con el pH de la corteza y las concentraciones de NH_3 .

Dieciséis especies de líquenes epifitos se correlacionaron con el pH de la corteza, trece negativamente y 3 positivamente lo que nos dice de la importancia de este factor. Por tanto se concluyó que el efecto de NH_3 en los líquenes nitrofilos viene determinado por un aumento del pH de la corteza en vez de un aumento de la disponibilidad de NH_4^+ . (10)

5.4 Líquenes y metales pesados

A pesar de que los líquenes se limitan a absorber los metales disueltos en el agua que reciben, en el caso de que estos sean tóxicos, pueden verse afectados. La absorción intracelular está condicionada por la naturaleza del ion metálico, permeabilidad de la membrana y la concentración de ligandos extracelulares con afinidad por los cationes, mientras que en la absorción extracelular es esencialmente un proceso pasivo de intercambio iónico determinado por el carácter de los ligandos de las paredes celulares del hongo.

Asimismo, contamos con una gran cantidad de trabajos que demuestran que los líquenes son bioacumuladores de metales pesados.

Un trabajo particularmente preciso que demuestra el tipo de estudio que se puede hacer en largos periodos 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 el uso de combustible sin plomo disminuyeron a los niveles que tenían en 1930. (18)

Gordon y otros analizaron en 1996 la deposición de metales en *Hypotrachyna endochlora* 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.

Brightman en 1977, comprobó que los líquenes pueden resultar eliminados al recibir continuamente el goteo de alto contenido en cobre provenientes de las líneas de alta tensión, así como que el hierro resulta un sustrato favorable para el crecimiento de algunas especies particulares de líquenes. (25)

En un estudio realizado por varios autores, en la ciudad de Valencia y alrededores, se demostró que la concentración de metales pesados en el centro de la ciudad era mucho mayor que en la zona rural de Albarracín.

Los elementos más abundantes con respecto a las tres especies estudiadas (*Candelariella*, *Lecanora*, *Caloplaca*) fueron Cu Mb y el Sb y principalmente de Cd, debido a la industria agrícola, cerámica, automovilística y de la construcción todas ellas abundantes en Valencia. (26)

Diversos estudios también relacionan la contaminación de metales pesados en el aire con la aparición de ciertas enfermedades como el cáncer, en 1997 Cislighi y Nims establecieron la correlación en Italia entre zonas delimitadas por líquenes que reflejaban los grados de contaminación por metales pesados y la frecuencia de cáncer de pulmón. (27)

Riccardi, en 2001, realizó un monitoreo con líquenes epifitos en un área de Nápoles, donde se encontraban elevados tumores digestivos en la población pudiendo relacionarlo con la elevada contaminación de metales pesados.

En Suiza, Herzig et al. (1989, 1990) hicieron uso de una variedad de análisis para comparar las concentraciones de los elementos en *Hypogymnia physodes* en la

contaminación atmosférica total evaluada por las comunidades de líquenes mediante IPA y una red de monitoreo, pudiendo diferenciar tres grupos:

-Grupo 1: en el que el Ca, era el único elemento que se incrementaba con la calidad del aire.

-Grupo 2: en el que las concentraciones de los elementos Pb, Fe, Cu, Cr, S, Zn, y P disminuyeron en distintos gradientes con la disminución de la contaminación del aire. Un ejemplo de ello es que la concentración de Plomo se vio reducida seis veces en las zonas de baja contaminación comparado con las zonas de más alta contaminación.

-Grupo 3: en el que las concentraciones de los elementos Li, Cd y Co fueron bajas con baja contaminación con respecto a cuando hay alta contaminación.
(28)

5.5 Líquenes y Ozono

El O₃ fue identificado como el principal contaminante que fomenta el deterioro de árboles y especies epífitas, como líquenes y briófitos, debido a que aumenta la susceptibilidad a otros factores de estrés como las sequías, plagas, temperaturas extremas, además de la tasa de mortalidad. En cuanto a los efectos que genera, se ha observado en diversos estudios que el Ozono:

- Incapacita la fotosíntesis atacando la clorofila, por lo que además también ocasiona la decoloración de los talos.
- Afecta a la respiración celular.
- Desestabiliza las membranas.
- Según a la distancia a la que se encuentre del foco emisor, ocasionará la separación del liquen del sustrato.
- Interrumpe la fijación de Nitrógeno y la transferencia de carbohidratos y nutrientes del alga o cianobacterias al hongo, lo que ocasiona la desestabilización de la estructura ocasionando la muerte. (3)

Diversos estudios en los que se expuso a diferentes especies frente a distintas concentraciones de Ozono, pusieron de manifiesto que para el caso de las especies *Pseudoparmelia* y *Lobaria pulmonaria* sí que se redujo la fotosíntesis por blanqueo del talo, pero para otra especie como *Ramalina menziessi*, esta no sufrió ninguna alteración.

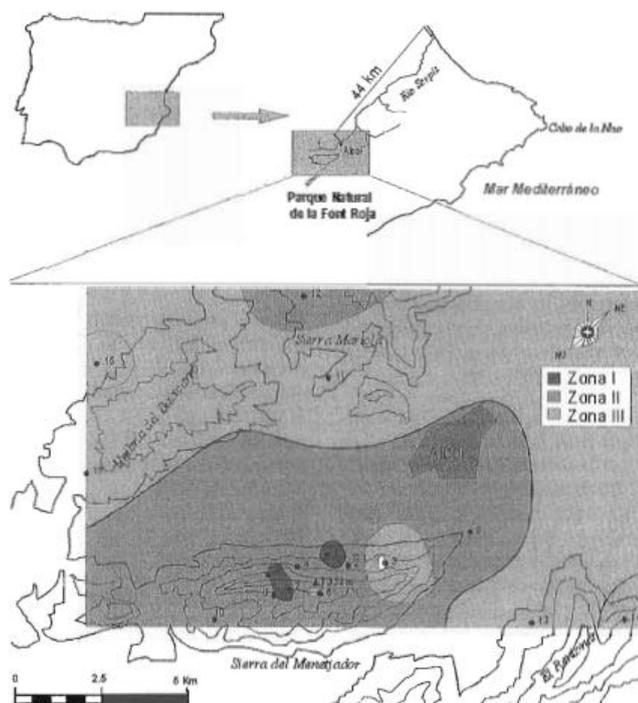
Por lo que podemos decir que el efecto del ozono puede depender de diferentes factores como la concentración de ozono a la que se encuentre expuesta, el tiempo de exposición y las características de la especie.(5)

La tolerancia a bajas concentraciones puede estar relacionada con los mecanismos de defensa de estos organismos, que son los llamados metabolitos secundarios contra el estrés oxidativo en relación también con su estrategia poiquilohídrica. (6)

Al estar estrechamente relacionado con esta capacidad poiquilohídrica de estas especies otros factores que incluyen en esta tolerancia son las condiciones ambientales, ya que se comprobó Bertuzzi en Valencia y las Islas que las lesiones se daban con mayor frecuencia en las horas más secas del día. (7)

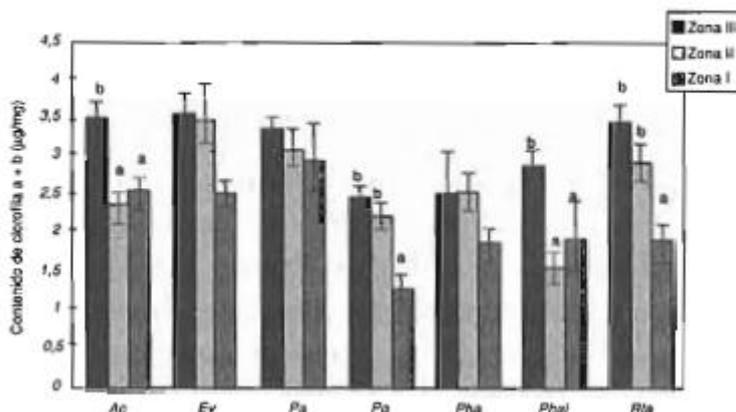
5.6 Clorofila

Esperanza Calvo y María José Sanz llevaron a cabo un estudio en el Parque Natural del Carrascal de la Font Roja y su entorno. Dividieron en tres zonas, dependiendo de la calidad del aire. Siendo la zona III la zona con mayor calidad del aire, la zona II con calidad de aire intermedia y la zona I con baja calidad de aire. (2)



Se pudo comprobar que a cuanto mayor calidad de aire mayor cantidad de clorofila, con algunas peculiaridades como en *Anaptychia ciliaris*, la cantidad de clorofila b, en la

zona I y II se reduce en un 40% con respecto a la zona III siendo esta especie la única en la que existen diferencias significativas entre la zona I y II . También se ha observado que la concentración de clorofila b muestra una correlación muy alta con los valores de IPA para las localidades del parque, lo que parece indicar que la clorofila b puede ser una variable más sensible que la clorofila a.



6. CONCLUSIONES

Podemos concluir afirmando que los líquenes son muy buenos bioindicadores de la calidad del aire como demuestra la amplia literatura disponible.

Cabría la posibilidad de que algún día fueran reemplazados por la tecnología, con aparatos o técnicas muy sofisticadas, pero en la actualidad son sin duda los más fiables con los que contamos para determinar si una zona está contaminada y por consiguiente, determinar el efecto de esta contaminación en sistemas biológicos y en procesos metabólicos fundamentales como la respiración y la fotosíntesis.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Hawksworth DL, Iturriaga T, Crespo A. Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios mediambientales en los trópicos. *Rev. Iberoam Micol.* 2005; 22 71-82.
2. Calvo E, Sanz MJ. Líquenes como bioindicadores de la calidad ambiental en el Parque Natural de La Font Roja (Alicante, España). *Ecología.* 2000; nº 14: pp 103-115.
3. Barreno, E. & Pérez-Ortega, S. (2003). Cap.6 Los líquenes y el medio. Consejería del medio ambiente, ordenación del territorio e infraestructuras del Principado de Asturias. KRK ediciones.
4. Bertuzzi, S., Davies, L., Power, S.A., Tretiach. M (2013). Why lichens are bad biomonitors of ozone pollution? *Ecological Indicators* 34 (2013) 391– 397.
5. Ross, L. J., & Nash III, T. H. (1983). Effect of ozone on gross photosynthesis of lichens. *Environmental and Experimental Botany*, 23 (1), 71-77.
6. Tarhanen, S., Holopainen, T., & Oksanen, J. (1997). Ultrastructural changes and electrolyte leakage from ozone fumigated epiphytic lichens. *Annals of Botany*, 80(5), 611-621.
7. Valencia-Islas, N., Zambrano, A., & Rojas, J. L. (2007). Ozone reactivity and free radical scavenging behavior of phenolic secondary metabolites in lichens exposed to chronic oxidant air pollution from Mexico City. *Journal of chemical ecology*, 33(8), 1619-1634.
8. 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 (2) 111-112.
9. Sigal, L. L. (1988). The relationship of lichen and bryophyte research to regulatory decisions in the United States. In lichens, Bryophytes and Air Quality.(T.H. Nash III & V.Wirth, eds): 269-287. Berlin-Stuttgart: Cramer

10. Frati L., Santoni S., Nicolardi V., Gaggi C., Brunialti G., Guttova A., Gaudino S., Pati A., Pirintsos S.A., Loppi S. (2007). Lichen biomonitoring of ammonia emission and nitrogen deposition around a pig stockfarm. *Environmental Pollution*; 146, 311-316.
11. Agencia de Protección Ambiental. Ministerio de Ambiente y Espacio Público. *Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire*: Buenos Aires; 2009.
12. Blasco M, Domeño C, Nerin C. Use of lichens as Pollution Biomonitoring in Remote Areas: Comparison of PAHs Extracted from Lichens and Atmospheric Particles Sampled in an Around the Somport Tunnel (Pyrenees). *Environ. Sci. Technol.* 2006; 40: 6384-6391.
13. Hawksworth, DL, Rose F. Qualitative scale for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. *Nature* 1976; 227:145-148.
14. 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.
15. Bretschneider S, Marcano 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.
16. 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.
17. Hawksworth DL. Lichens (lichen-forming fungi) in Buckingham Palace Garden. *London Naturalist* 1999; 78(Suppl.): 15-21.
18. Lawrey JD. Lichens as monitors of pollutant elements at permanent sites in Maryland and Virginia. *Bryologist* 1993; 96: 339-341.

19. A. Crespo, E. Manrique, E. Barreno & E. Serriña. Valoración de la contaminación atmosférica del área urbana de Madrid mediante bioindicadores (líquenes epifitos). *Anal. Inst. Bot. Cavanilles* 34(1):71-94 (1977).
20. Regina Carballal & Aida García Molares. Valoración de la contaminación atmosférica por SO₂ en la zona de Ferrol – Fene (La Coruña) mediante líquenes epifitos. *Acta Botánica Malacitana*, 16(1):197-206.
21. Nash TH III. *Lichen Biology*. 2^a ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2008.
22. 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
23. Bermúdez de Castro F, Muller A y Schmitz M.F. Líquenes fijadores de Nitrógeno Atmosférico. *Ecología*, N°4, 1990, pp 131-141.
24. De Bakker A.J. Effects of ammonia emission on epiphytic lichen vegetation. *Acta Bot. Neerl.* 38(3) September 1989, p.337-342.
25. Brightman FH, Seaward MRD. Lichens of man-made substrates. In: Seaward MRD (Ed.) *Lichen Ecology*. London, Academic Press, 1977: 253-293.
26. Bosch-Roig P, Barca D, Crisci GM, Lalli C. Lichens as bioindicators of atmospheric heavy metal deposition in Valencia, Spain. *J Atmos Chem.* 2013;70: 373-388.
27. Cislighi C, Nimis P. Lichens, air pollution and lung cancer. *Nature.* 1997; 387: 463-464.
28. Herzig, R., Liebendorfer, L., Urech, M., Amman, K., Cuecheva, M. & Landolt, W. (1989) Passive biomonitoring with lichens as a part of an integrated biological measuring system for monitoring air pollution in Switzerland. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 35: 43–57

29. González-Torres D. Lopez de Silanes M.E & Paz- Bermúdez G. Determinación de la contaminación atmosférica en la ciudad de Pontevedra mediante bioindicadores liquénicos. *Nova Acta Científica Compostelana (Biología)*, 15:37-46 (2006) – ISSN 1130-9717.
30. Lawrey JD. Lichens as monitors of pollutant elements at permanent sites in Maryland and Virginia. *Bryologist* 1993; 96: 339-341.