

# Comunidades de líquenes: indicadores de la calidad del aire en la ciudad de La Paz, Bolivia

Angela Canseco, Rafael Anze, Margot Franken

Unidad de Calidad Ambiental, Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés  
Campus Universitario, Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Bolivia

e-mail: angela.canse@gmail.com

## Resumen

El presente trabajo evaluó la calidad del aire en la ciudad de La Paz, usando el Índice de Pureza Atmosférica (IAP). Este método está basado en las alteraciones que produce la contaminación atmosférica sobre las comunidades de los líquenes. De acuerdo con este método, la presencia de especies tolerantes o sensibles y la modificación en la estructura y abundancia de la comunidad líquénica, por si misma, son capaces de expresar la calidad del aire de un área específica. Este método permite, de manera integral, clasificar las diferentes áreas estudiadas con relación al nivel de contaminación, y fue aplicado en un transecto determinado por la principal fuente de contaminación, el tráfico vehicular, en diferentes áreas de la ciudad. Los resultados muestran que en áreas de alta intensidad vehicular, consecuentemente más contaminadas, existe menor diversidad de líquenes, además de valores bajos de presencia y cobertura. Por otro lado, las áreas con menor contaminación registran mayor diversidad líquénica y valores mayores de cobertura y presencia. El método IAP puede ser considerado como una herramienta fácil y económica de aplicar en la medición de la calidad del aire utilizando bioindicadores.

Palabras clave: Líquenes, calidad del aire, contaminación atmosférica, sensibilidad, tolerancia, cobertura, IAP, bioindicación, bioindicadores, biomonitoreo pasivo, ciudad de La Paz.

## 1 Introducción

En los últimos años, la calidad del aire se ha visto afectada debido al incremento en la emisión de compuestos tóxicos, que han aumentado su peligrosidad, lo que puede verse reflejado en efectos que se producen en algunos organismos vivos que, de esta manera, reflejan las características y variaciones existentes en su medio ambiente. Esta información es de invaluable utilidad para la prevención y el control de la contaminación ambiental [13].

Esta manifestación o reacción de los organismos, es una peculiaridad que se puede usar como criterio de indicación [5]. De este modo, un bioindicador es un organismo o comunidades de organismos que responden a la contaminación por sustancias nocivas,

ya sea con alteraciones en sus funciones vitales o con la acumulación de tales sustancias [5], proporcionando de este modo información sobre el medio en que se encuentran.

Entre las distintas especies vegetales empleadas como bioindicadores, los líquenes son de esencial interés por su uso en la evaluación de la contaminación atmosférica. Su sensibilidad a la presencia de compuestos tóxicos en la atmósfera, como dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y ácido clorhídrico (HCl), por ejemplo, se manifiesta por alteraciones morfológicas y fisiológicas evidentes [20]. Muchas especies de líquenes pueden presentar una gran capacidad de acumulación de contaminantes tales como azufre, plomo y fluor, que toman de la atmósfera, que es su única fuente de nutrición [17], obteniendo una enorme resistencia a condiciones adversas que, junto a su crecimiento lento, les proporciona una elevada longevidad [15]. La causa de la resistencia o tolerancia de los líquenes hacia los distintos contaminantes depende fundamentalmente de la resistencia del protoplasma de la célula, de la fase metabólica y de la vitalidad y capacidad de inhibición de los efectos. En este sentido, la madurez del talo, es una de las razones primordiales del descenso en la diversidad y biomasa de líquenes en zonas contaminadas, porque simplemente no se pueden reproducir o los talos más jóvenes dejan de progresar [9].

Los métodos desarrollados para utilizar líquenes como bioindicadores y biomonitores de contaminación atmosférica tienden a relacionar la presencia o ausencia de especies, su densidad, frecuencia de aparición, porcentaje de cobertura y/o presencia y nivel de síntomas de daños externos o internos, con el grado de pureza del aire [1]. De esta forma, se pueden complementar los complejos análisis químicos, caracterizando la vegetación de líquenes en regiones no contaminadas y observando como su composición y abundancia disminuye al acercarse a zonas con fuentes de contaminación, hasta desaparecer completamente en regiones con altas concentraciones de sustancias nocivas [14]. Además, los análisis químicos permiten obtener resultados restringidos a los momentos mismos de la medición, mientras que los líquenes muestran los efectos de la contaminación durante amplios intervalos de tiempo [21].

## 2 Gestión de la Calidad del Aire

En los últimos años, en la ciudad de La Paz se han incrementado los estudios de evaluación de la calidad del aire, utilizando bioindicación y biomonitoreo, como métodos accesibles y aplicables. Entre los ejemplos de utilización de métodos fisicoquímicos destaca la Red Piloto de Monitoreo Atmosférico que operó el año 1992 y la Red "MoniCA" de Swisscontact en La Paz y El Alto desde el año 2000 y 2004 respectivamente. Los estudios de bioindicación y biomonitoreo incluyen los trabajos de Anze [2] [3], Pinto [19], Del Granado [8] y Garret [12]. Anze [2] utilizó líquenes como indicadores de la contaminación atmosférica por dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ , monitoreo activo), registrando cambios en la tasa de respiración de tres especies a lo largo del eje troncal de la ciudad (San Francisco–Seguenco) que se pudieron relacionar con la contaminación atmosférica por tráfico vehicular. Estudios posteriores mostraron que el

SO<sub>2</sub> presenta concentraciones muy bajas por lo que los efectos observados en los líquenes deben ser atribuidos a otro contaminante con efecto oxidante.

Adicionalmente, se han desarrollado intentos preliminares de evaluación de la calidad del aire por monitoreo pasivo, con la utilización de líquenes (Maestría en Ecología y Conservación, además de materias electivas del Pensum de la Carrera de Biología de la Universidad Mayor de San Andrés). Sin embargo, los resultados no tomaron en cuenta muchas zonas de la ciudad de La Paz que presentan comunidades de líquenes que pueden ser utilizadas como indicadoras para monitorear las inmisiones. Estos intentos han sido sólo ejercicios y no se ha completado todo el procedimiento.

El presente estudio aplicó el método IAP (Índice de Pureza Atmosférica), que analiza los efectos sobre las comunidades de líquenes debido a la contaminación, con el fin de evaluar la calidad del aire en el eje troncal de la ciudad de La Paz y así obtener una zonificación de la ciudad.

### **3 Metodología**

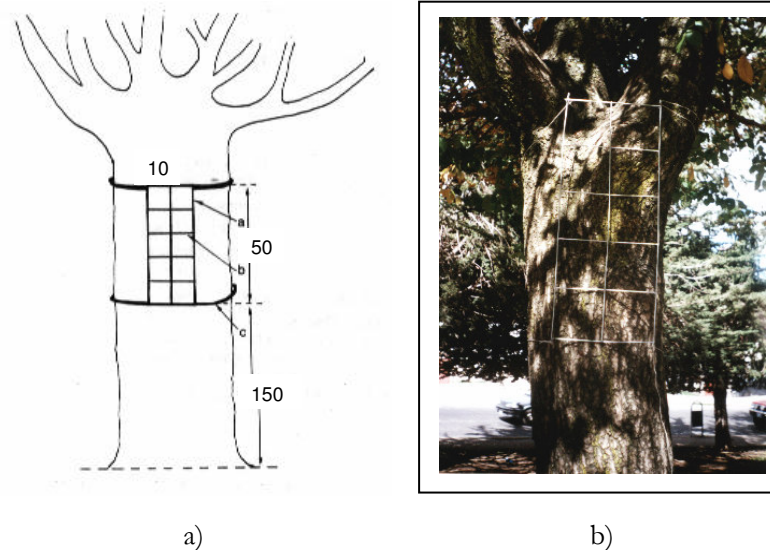
El presente trabajo consistió en la evaluación de la calidad del aire en la ciudad de La Paz, por cartografía de líquenes y cálculo del Índice IAP, de acuerdo a lo propuesto por García & Rubiano [11] y reformulado por Steubing & Fangmeier [22].

Se desarrollaron las siguientes actividades:

- 1) Se efectuaron estudios taxonómicos para identificar y determinar las especies de líquenes presentes en la ciudad de La Paz.
- 2) Se eligieron los forófitos (sustratos para las comunidades de líquenes), utilizando los siguientes criterios:
  - a) Adultos sanos, con un mínimo de 50 cm de perímetro.
  - b) Individuos de corteza rugosa con pH neutro.
  - c) Se excluyeron árboles inclinados, dañados, pintados y de corteza lisa.
  - d) La unidad de muestreo para el estudio fue definida por un grupo de diez árboles de la misma especie. En los lugares en el que el número de árboles no llegaba a diez, los parámetros medidos dentro del método IAP fueron extrapolados a 10 y en los lugares donde se sobrepasaron los 10 árboles requeridos para la aplicación del método, los resultados, de los diferentes parámetros fueron transformados, utilizando una regla de tres simple, al equivalente de 10 árboles.
- 3) Se seleccionaron 21 lugares de muestreo, tomando en cuenta los siguientes criterios:
  - a) Presencia de forófitos seleccionados portadores de líquenes.

- b) Establecimiento de un transecto, determinado por la principal vía de tráfico vehicular, (principal fuente de contaminación en la ciudad de La Paz), incluyendo las distintas zonas geográficas.
- c) Tipificación de las actividades de la zona (comercial, residencial e industrial).
- d) Condiciones ambientales (zonas contaminadas y zonas sin contaminación).

4) En cada área de muestreo, se aplicó la metodología propuesta por la norma VDI-3799 (cartografía de líquenes) a cada forófito seleccionado. De acuerdo con esta norma, se utilizó una rejilla de relevamiento de líquenes, tal como se muestra en la figura 1. La altura de muestreo tuvo que ser modificada entre 1,50 hasta 2 m, por el calado de los árboles que alcanza más de 1 m de altura.



**Figura 1:** Dibujo esquemático de árbol de ensayo con rejilla de relevamiento de líquenes (a), según la norma VDI-3799. A = listón de madera, B= cordón delgado, C = liga de goma. Fotografía del árbol y la rejilla (b).

Se utilizó una rejilla de  $1/10 \text{ m}^2$  en cada árbol, obteniéndose así una superficie de estudio de  $1 \text{ m}^2$  para cada lugar de muestreo, donde cada cuadrado de la rejilla tiene un área de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ .

- Los parámetros medidos en cada forófito, fueron: a) frecuencia (número de cuadrados en los que se encuentra una especie en estudio); b) cobertura (porcentaje de dicha especie en la superficie cubierta); c) presencia de la especie en los 10 árboles estudiados.

- Con los datos obtenidos se calculó el IAP para cada lugar de muestreo, utilizando la siguiente fórmula, propuesta por García & Rubiano [11] y reformulada por Steubing & Fangmeier [22]:

$$IAP_j = \sum (Q_i f_i) \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

$IAP_j$  = Índice de Pureza Atmosférica de la estación j.

$f_i$  = Grado de frecuencia más grado de cobertura, más el número de los árboles examinados cubiertos por la especie en cuestión. El valor f se modifica de estación a estación.

$Q_i$  = Factor de tolerancia de la especie i, que se determina analizando el número de especies acompañantes como promedio en todas las estaciones. El valor de Q resulta ser una constante para cada especie, en el área de investigación, siendo inversamente proporcional a la contaminación.

Se lo determina con la relación:

$$Q_i = \sum_j \frac{(A_j - 1)}{N_j} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

$Q_i$  = Factor de resistencia de la especie i.

$A_j$  = Número de especies presentes en cada estación ( j ) donde se encuentra la especie i.

$N_j$  = Número de estaciones ( j ) donde se encuentra la especie i.

- Con los valores de IAP obtenidos, se utilizó la metodología propuesta por García & Rubiano [11], sobre la base de la relación entre el IAP Máximo Teórico sobre el IAP Máximo Observado, para el establecimiento de rangos de IAP que permiten la zonificación del área de estudio en función a los diferentes posibles niveles de contaminación existente.

Se aplicó la siguiente relación

$$IAP_{\text{máx.teorico}} = S^2 - S$$

donde:

$S$  = número total de especies de líquenes estudiadas

$$\text{Cociente de Relación} = \frac{IAP_{\text{max.teórico}}}{IAP_{\text{máx.observado}}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Con el cociente calculado se realizó la agrupación de los rangos y su respectiva clasificación de nivel de contaminación.

**Tabla 1:** Valores de IAP para la zonificación

Rangos	Clasificación	
IAP min –	I	Contaminación muy alta
–	II	Contaminación alta
–	III	Contaminación media
–	IV	Contaminación baja
–	V	Contaminación muy baja
– IAPmax.observado	VI	Sin contaminación

## 4 Resultados

### 4.1 Lugares de muestreo

La siguiente tabla presenta las características de cada lugar de muestreo, que son de utilidad en el análisis del monitoreo pasivo.

### 4.2 Diversidad líquénica

En la ciudad de La Paz se encontró un total de 27 especies de líquenes. De ese total, sólo se trabajó con 17 especies que se encuentran sobre los forófitos seleccionados, y sólo éstas sirvieron en el método de cartografía y cálculo de IAP.

De las 17 especies utilizadas en el método, 12 especies son foliosas, 4 son costrosas y 1 es fruticosa.

**Tabla 2:** Características generales para cada lugar de muestreo

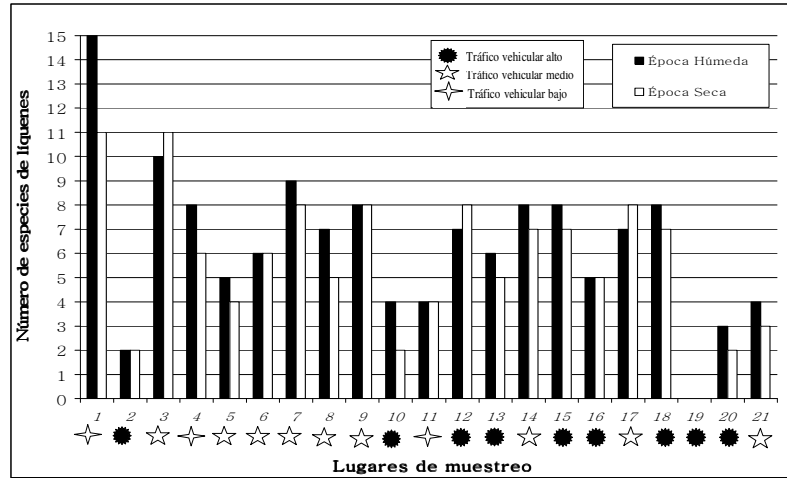
Código / Lugar	Tipo de zona	Intensidad de tráfico	Tipo de vía	Tipo de tráfico	Área verde (%)	Altura de los edificios	
<b>Zona Sur</b>							
1	Cota Cota	Residencial	Baja	Calle Angosta	Liviano	80	De 1-6 pisos
2	San Miguel 1, Calle 21	Residencial/Comercial	Alta	Avenida ancha	Liviano	10	Mayor a 6 pisos
3	San Miguel 2, Prolongación Montenegro	Residencial	Media	Avenida angosta	Liviano	30	De 1-3 pisos
4	San Miguel 3, Ignacio Cordero	Residencial	Baja	Calle angosta	Liviano y pesado	12	De 1-3 pisos
5	Achumani, entrada	Residencial	Media	Avenida angosta	Liviano	10	Mayor a 6 pisos
6	Calacoto, Calles 21 a la 17	Residencial/Comercial	Media	Avenida ancha	Liviano y pesado	15	Mayor a 6 pisos
7	Calacoto, Calles 15 a la 8	Residencial/Comercial	Media	Avenida ancha	Liviano y pesado	20	Mayor a 6 pisos
8	La Florida 1, entre Lincoln y Kennedy	Residencial/Comercial	Media	Avenida mediana	Liviano y pesado	25	Mayor a 6 pisos
9	La Florida 1, entre Lincoln y Los Sauces	Residencial/Comercial	Media	Avenida mediana	Liviano	25	Mayor a 6 pisos
10	Obrajes, Calles 9 a la 10	Residencial/Comercial	Alta	Avenida angosta	Liviano	10	De 3-6 pisos
11	Obrajes, Calle 2	Residencial/Comercial	Baja	Avenida angosta	Liviano	10	Mayor a 6 pisos
<b>Zona Central</b>							
12	Sopocachi, Plaza Isabel la Católica	Comercial	Alta	Plaza redonda	Liviano y pesado	20	Mayor a 6 pisos
13	El Prado, Av. 16 de Julio	Comercial	Alta	Avenida angosta	Liviano y pesado	30	Mayor a 6 pisos
14	San Pedro 1, Plaza Israel	Medianamente residencial	Media	Plaza circular pequeña	Liviano	18	De 3 -6 pisos
15	San Pedro 2, Plaza Sucre	Comercial	Alta	Plaza cuadrada	Liviano y pesado	35	De 3 - 6 pisos
16	Miraflores 1, Plaza San Martín	Comercial	Alta	Plaza triangular	Liviano y pesado	20	Mayor a 6 pisos
17	Miraflores 2, Calle Héroes del Pacífico	Medianamente residencial	Media	Calle angosta	Liviano	15	De 3 - 6 pisos
18	Miraflores 3, Plaza Villarroel	Medianamente residencial	Alta	Plaza cuadrada	Liviano y pesado	35	De 1 - 3 pisos
<b>Zona Norte</b>							
19	Avenida Montes	Comercial	Alta	Avenida mediana	Liviano y pesado	4	Mayor a 6 pisos
20	Calle Manco Kápac	Comercial/Industrial	Alta	Calle angosta	Pesado	8	Mayor a 6 pisos
21	Achachicala	Comercial/Industrial	Media	Plaza triangular	Liviano y pesado	20	De 3- 6 pisos

**Tabla 3:** Especies de líquenes utilizados en el método de cartografía y cálculo de IAP

<b>Especies Foliosas</b>
<i>Candelaria concolor</i> (Dickson) B. Stein
<i>Candelariella reflexa</i> (Nyl.) Lettau
<i>Flavopunctelia flaventior</i> (Stirt.) Hale
<i>Josefpoeltia boliviensis</i> Kondraty. & Krärnef.
<i>Phaeophyscia adiantola</i> (Essl.) Essl.
<i>Physciella chloantha</i> (Ach.) Essl.
<b>Especies Foliosas</b>
<i>Physcia undulata</i> Moberg
<i>Physcia</i> sp 1.
<i>Physcia</i> sp 2.
<i>Punctelia subrudecta</i> (Nyl.) Krog
<i>Xanthoria mendozæ</i> Räs.
<i>Xanthoria parietina</i> (L.) Th.
<b>Especies Costrosas</b>
<i>Caloplaca</i> sp 1.
<i>Caloplaca</i> sp 2.
<i>Lepraria</i> sp 1.
<i>Lepraria</i> sp 2.
<b>Especies Fruticosas</b>
<i>Teloschistes chrysophthalmus</i> (L.) Th. Fr. (Ach.) Essl.



La siguiente figura compara el número de especies de líquenes encontrados en los lugares seleccionados en la época húmeda y en la época seca.



**Figura 2:** Número de especies encontradas en cada lugar de muestreo.

En ambas épocas (húmeda y seca) se observó que la mayor diversidad de líquenes se encuentra en zonas con condiciones climáticas favorables y con baja intensidad del tráfico vehicular (Código 1 y Código 4). La mayoría de estas especies no están presentes en lugares de similar clima pero con alta intensidad de tráfico vehicular (Código 2 y Código 10) ni se las encuentra en lugares de alto tráfico y de condiciones climáticas no favorables para el crecimiento de los líquenes (Código 19).

En lugares donde el clima es favorable (zona sur) pero la intensidad del tráfico es media y/o en zonas de clima desfavorable y también de intensidad vehicular media, la diversidad líquénica es media, estos lugares en su mayoría son Plazas y Avenidas con un porcentaje alto de área verdes. El área verde presente puede considerarse una barrera a los contaminantes, además de un factor que aumenta la humedad.

### 4.3 Frecuencia líquénica

Las siguientes figuras presentan los datos de la Frecuencia Líquénica de cada tipo morfológico para cada lugar de muestreo, en la época húmeda y en la seca.

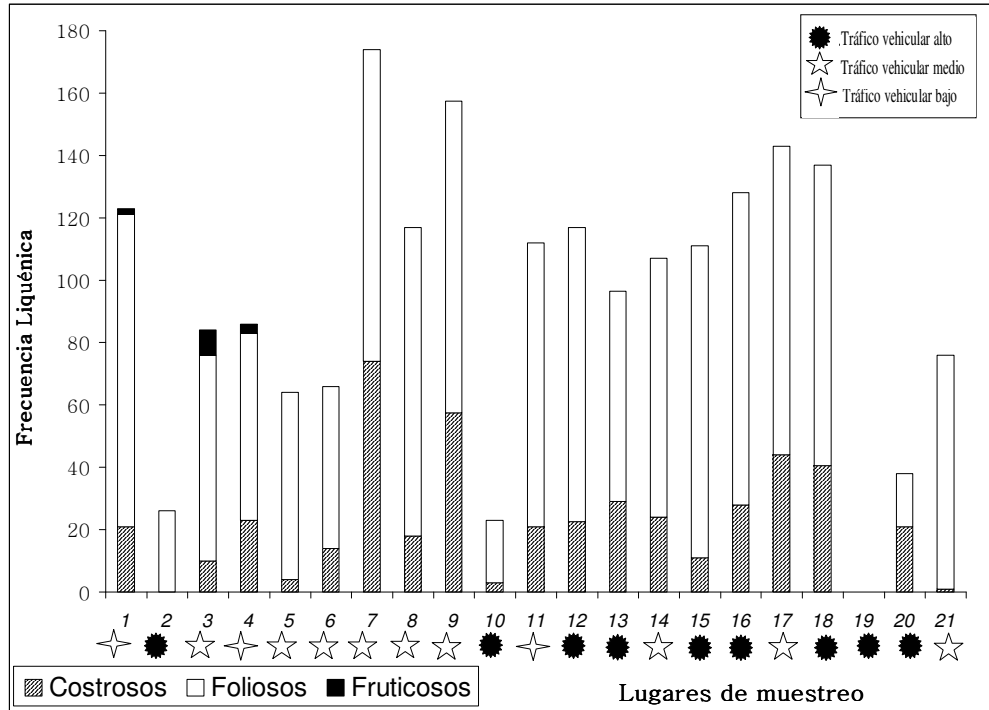


Figura 3: Frecuencia líquénica según el tipo morfológico para cada lugar de muestreo en la época húmeda.

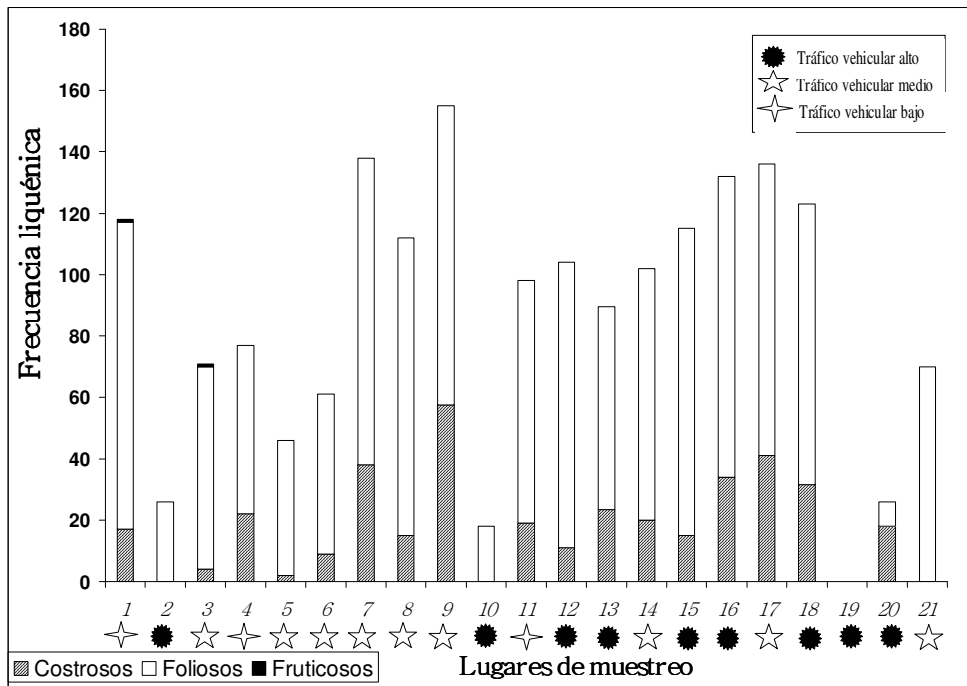


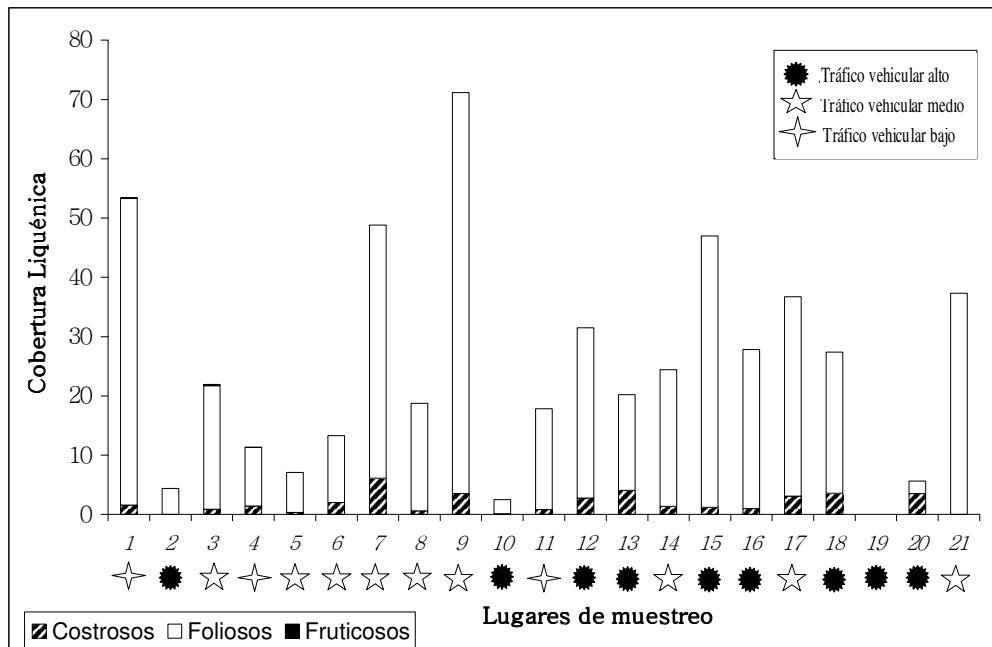
Figura 4: Frecuencia líquénica según el tipo morfológico para cada lugar de muestreo en la época seca.

De manera muy clara, para ambas épocas, la mayor frecuencia liquénica está representada por el tipo morfológico folioso, ya que en la mayoría de los lugares de muestreo, el tipo morfológico folioso está presente en más de la mitad de las superficies de estudio. Sin embargo, en los códigos 2 y 10 tienen menor frecuencia y en el código 19 llega a desaparecer. La intensidad vehicular de estos lugares es alta y en comparación con otros lugares que cuentan con la misma intensidad de tráfico vehicular, estos lugares son avenidas y calles con poca área verde, por lo que las especies de líquenes se encuentran más expuestas a los contaminantes provenientes del alto tráfico vehicular.

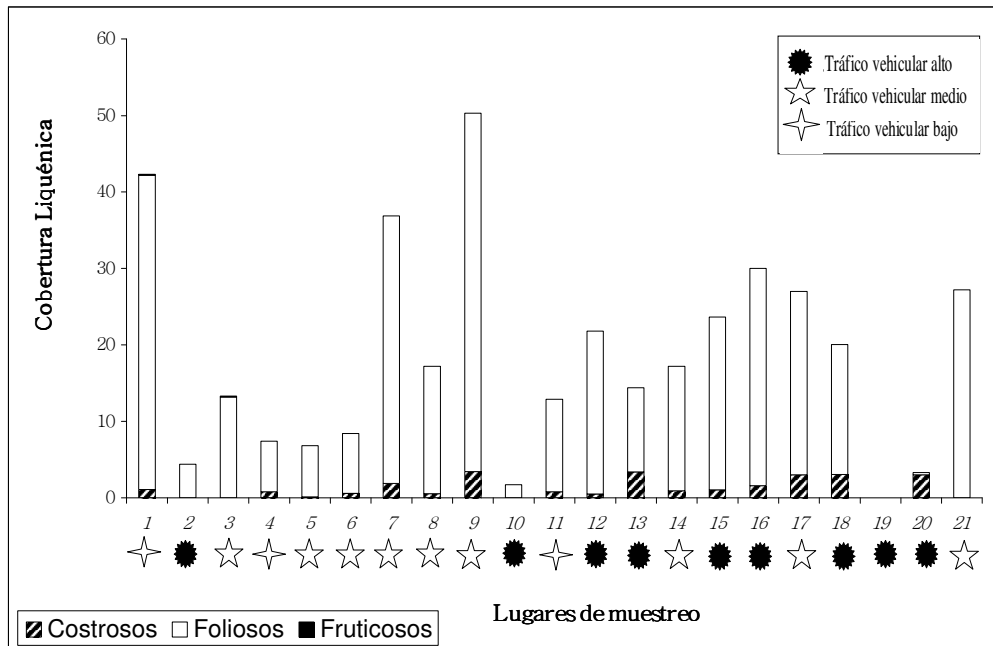
En el caso del tipo morfológico costroso, se encuentran en todos los lugares, no obstante su frecuencia es menor a la observada en los foliosos. Finalmente los líquenes fruticosos son los de menor frecuencia y sólo están presentes en lugares de condición climática favorable y baja intensidad de tráfico vehicular (códigos 1 y 3).

#### 4.4 Cobertura liquénica

Las siguientes figuras presentan los datos de la cobertura liquénica de cada tipo en los diferentes lugares de muestreo, tanto para la época húmeda como la seca.



**Figura 5:** Cobertura liquénica para cada tipo morfológico en la época húmeda

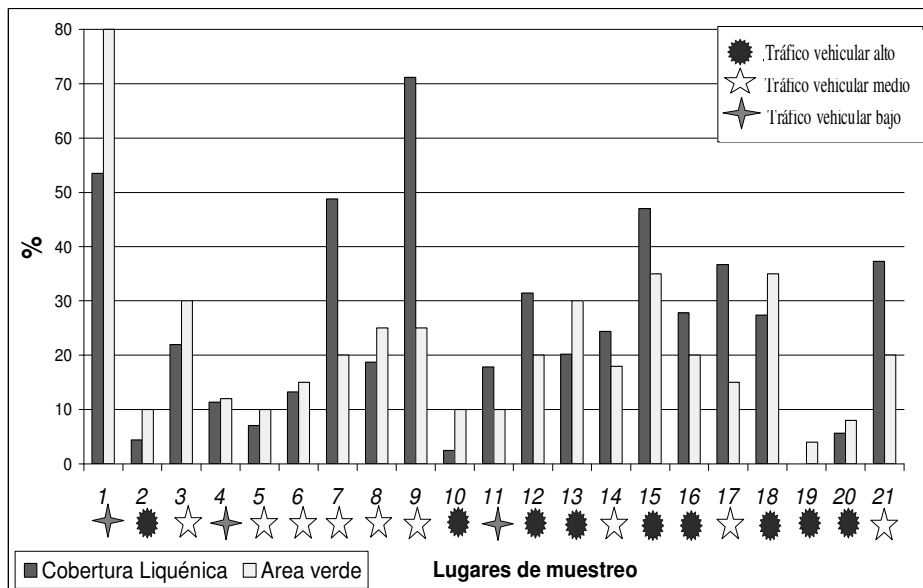


**Figura 6:** Cobertura líquénica para cada tipo morfológico en la época seca

De manera similar a los resultados obtenidos para la frecuencia líquénica, la mayor cobertura líquénica corresponde al tipo morfológico folioso, seguido por los líquenes costrosos y finalmente los fruticosos que presentan valores de cobertura muy bajos. Sin embargo, se debe considerar que la cobertura es un promedio y se han registrado valores muy bajos, por lo que se podría deducir que a valores altos de frecuencia, no necesariamente se tiene una cobertura alta, debido a la independencia de estos parámetros.

Las especies foliosas presentes, parecen ser tolerantes a la intensidad media del tráfico. Las menores coberturas, correspondientes a *Physcia undulata* y *Physciella obloantha*, se presentan en los códigos 2, 10 y 19 que tienen alto tráfico vehicular. En relación con la cobertura de los líquenes costrosos, se observa la mayor cobertura para las especies *Caloplaca sp.1* y *Leparia sp.1*, en zonas de intensidad vehicular media (Códigos 7 y 8) y la menor (casi nula) para las mismas especies en zonas de alto y medio tráfico vehicular. Las especies fruticosas, que son reconocidas como sensibles presentan una cobertura menor a 1% y se encuentran solo en el código 1, código 3 y código 4, sitios de bajo tráfico vehicular.

La cobertura de los líquenes en la corteza de los forófitos puede relacionarse con la extensión de las áreas verdes en los lugares de muestreo (Figura 7). En los lugares con poca vegetación (superficie verde menor al 10%) la cobertura de líquenes es baja, debido a la baja presencia de humedad. Lugares de muestreo con alto tráfico vehicular y con áreas verdes mayores al 30% (Avenidas anchas y Plazas) presentan una cobertura relativamente elevada, debido a que los contaminantes pueden ser dispersados fácilmente por el viento, además de los niveles elevados de humedad y probablemente a la absorción de los contaminantes por la vegetación presente en el lugar.



**Figura 7:** Cobertura de líquenes sobre árboles y superficie de áreas verdes en los lugares de muestreo

#### 4.5 Sensibilidad y tolerancia de las especies de líquenes a los contaminantes

Según el factor de Tolerancia (Q) se obtuvieron los siguientes valores en las épocas húmeda y seca:

**Tabla 4:** Factor de Tolerancia de las especies de líquenes en las épocas húmeda y seca.

Especie de Líquen	Tipo morfológico	Factor de Tolerancia (Q <sub>i</sub> ) Época Húmeda	Factor de Tolerancia (Q <sub>i</sub> ) Época Seca
<i>Physcia sp.1</i>	Folioso	14,0	14,0
<i>Physcia sp. 2</i>	Folioso	14,0	10,0
<i>Punctelia subrudecta</i>	Folioso	14,0	10,0
<i>Lepraria sp.2</i>	Costroso	10,5	10,0
<i>Teloschistes chrysophthalmus</i>	Fruticoso	10,0	10,0
<i>Phaeophyscia adiantola</i>	Folioso	10,0	-
<i>Xanthoria parietina</i>	Folioso	8,8	9,0
<i>Flavopunctelia flaventior</i>	Costroso	8,8	7,7
<i>Caloplaca sp.2</i>	Costroso	8,2	8,3
<i>Xanthoria mendozæe</i>	Folioso	7,0	6,6
<i>Caloplaca sp.1</i>	Costroso	6,7	5,8
<i>Lepraria sp.1</i>	Costroso	6,6	5,5
<i>Candelaria concolor</i>	Folioso	5,9	5,1
<i>Physciella chloantha</i>	Folioso	5,9	5,3
<i>Josefpeltia boliviensis</i>	Folioso	5,7	6,5
<i>Physcia undulata</i>	Folioso	5,7	5,2
<i>Candelariella reflexa</i>	Folioso	5,4	5,4

Conociendo que el factor de tolerancia es indirectamente proporcional a los niveles de contaminación, se construyó la siguiente tabla que muestra especies tolerantes, medianamente tolerantes y sensibles.

**Tabla 5:** Factor de tolerancia de las especies de líquenes en la época húmeda

	Líquenes costrosos	Líquenes foliosos	Líquenes fruticosos
<b>Especies sensibles</b>	<i>Lepraria sp.2</i>	<i>Physcia sp.1</i> <i>Physcia sp. 2</i> <i>Punctelia subrudecta</i> <i>Phaeophyscia adiastrata</i>	<i>Teloschistes chrysophthalmus</i>
<b>Especies resistentes</b>		<i>Candelaria concolor</i> <i>Physciella chloantha</i> <i>Josefpoeltia boliviensis</i> <i>Physcia undulata</i> <i>Candelariella reflexa</i>	
<b>Especies de tolerancia media</b>	<i>Caloplaca sp.2</i> <i>Caloplaca sp.1</i> <i>Lepraria sp.1</i>	<i>Xanthoria parietina</i> <i>Flavopunctelia flaventior</i> <i>Xanthoria mendozæ</i>	

**Tabla 6:** Factor de tolerancia de las especies de líquenes en la época seca

	Líquenes costrosos	Líquenes foliosos	Líquenes fruticosos
<b>Especies sensibles</b>	<i>Lepraria sp.2</i>	<i>Physcia sp.1</i> <i>Physcia sp. 2</i> <i>Punctelia subrudecta</i>	<i>Teloschistes chrysophthalmus</i>
<b>Especies resistentes</b>	<i>Caloplaca sp.1</i> <i>Lepraria sp.1</i>	<i>Candelaria concolor</i> <i>Physciella chloantha</i> <i>Physcia undulata</i> <i>Candelariella reflexa</i>	
<b>Especies de tolerancia media</b>	<i>Caloplaca sp.2</i>	<i>Xanthoria parietina</i> <i>Flavopunctelia flaventior</i> <i>Xanthoria mendozæ</i> <i>Josefpoeltia boliviensis</i>	

Las especies que presentan una mayor tolerancia a la contaminación se encuentran en la mayoría de los lugares de muestreo, es decir, tanto en lugares sin contaminación, donde los factores climáticos favorecen altamente su crecimiento y desarrollo, como en lugares donde el incremento en contaminación puede hacerse evidente por el flujo vehicular. Estas especies se adaptan a la situación, sea por acumulación y/o por formación de quelatos [18].

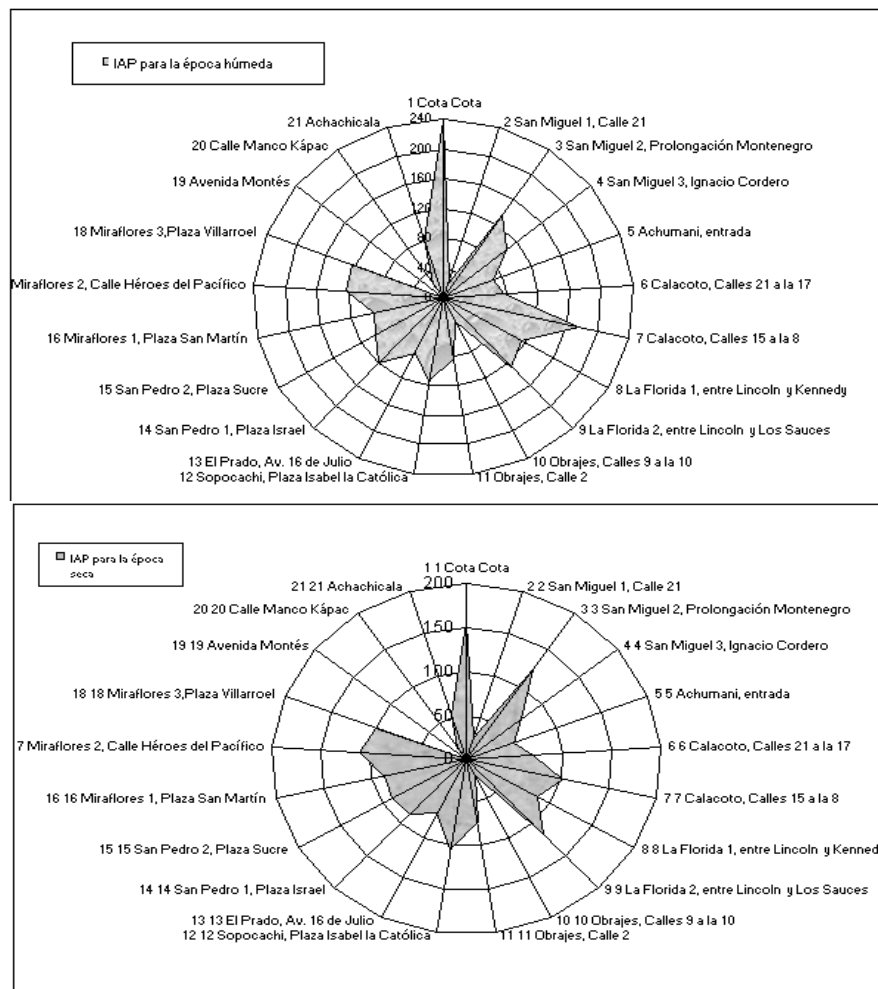
Especies como *Phaeophyscia adiastrata*, que presenta una alta sensibilidad a los contaminantes, desaparece para la época seca en zonas de bajo tráfico vehicular, por

tanto su desaparición puede deberse a la falta de humedad determinada por la época seca.

En el caso de *Josefpoeltia boliviensis* se muestra una menor tolerancia a los contaminantes para la época seca, lo cual justifica su disminución y desaparición en zonas que presentan una alta intensidad de tráfico vehicular y no así como respuesta a los cambios climáticos como la reducción en la humedad relativa del ambiente.

#### 4.6 Cálculo del índice de pureza atmosférica (IAP)

Para ambas épocas y utilizando la fórmula propuesta por García & Rubiano [11] y reformulada por Steubing & Fangmeier [22], se calcularon los valores de IAP para cada lugar de muestreo, que se muestran en las siguientes gráficas:



**Figura 8:** Valores del Índice de Pureza Atmosférica de los lugares seleccionados en la ciudad de La Paz para la época húmeda (arriba) y seca (abajo).



Las figuras muestran que existe una misma tendencia de IAP para ambas épocas, las pocas diferencias pueden deberse a respuestas del comportamiento de los líquenes a cambios climáticos, en especial la disminución de la humedad. Sin embargo, en época húmeda las diferencias en el valor del índice para los diferentes sitios de muestreo son más marcadas.

En función de los valores de IAP obtenidos en la época húmeda y seca, y que varían entre 0 y 239, se definieron los rangos y su categoría respectiva de la calidad atmosférica. (Tabla 7).

**Tabla 7:** Zonificación del nivel de calidad de aire en los lugares de muestreo para la ciudad de La Paz en la época húmeda y época seca, en el eje principal de Suroeste a Noroeste (lugares del 1 al 18) y en un eje lateral corto de Sur a Norte (lugares del 19 al 22)

Lugar de muestreo	Época Húmeda		Época Seca	
	IAP	Clasificación	IAP	Clasificación
1 Cota Cota	239.0	<b>Sin contaminación</b>	156.1	<b>Sin contaminación</b>
2 San Miguel 1, Calle 21	23.2	Contaminación Media	26.1	Contaminación Media
3 San Miguel 2, Prolongación Montenegro	133.8	<b>Sin contaminación</b>	124.4	<b>Sin contaminación</b>
4 San Miguel 3, Ignacio Cordero	103.1	Contaminación Muy Baja	71.0	Contaminación Muy Baja
5 Achumani, entrada	67.2	Contaminación Muy Baja	52.3	Contaminación Baja
6 Calacoto, Calles 21 a la 17	76.8	Contaminación Muy Baja	68.6	Contaminación Muy Baja
7 Calacoto, Calles 15 a la 8	174.1	<b>Sin contaminación</b>	102.6	Contaminación Muy Baja
8 La Florida 1, entre Lincoln y Kennedy	113.9	Contaminación Muy Baja	84.5	Contaminación Muy Baja
9 La Florida 1, entre Lincoln y Los Sauces	126.5	Contaminación Muy Baja	115.7	<b>Sin contaminación</b>
10 Obrajés, Calles 9 a la 10	35.8	Contaminación Baja	20.5	Contaminación Media
11 Obrajés, Calle 2	83.6	Contaminación Muy Baja	73.8	Contaminación Muy Baja
12 Sopocachi, Plaza Isabel la Católica	114.3	Contaminación Muy Baja	103.6	Contaminación Muy Baja
13 El Prado, Av. 16 de Julio	81.6	Contaminación Muy Baja	68.7	Contaminación Muy Baja
14 San Pedro 1, Plaza Israel	118.7	Contaminación Muy Baja	85.9	Contaminación Muy Baja
15 San Pedro 2, Plaza Sucre	98.6	Contaminación Muy Baja	88.2	Contaminación Muy Baja
16 Miraflores 1, Plaza San Martín	89.3	Contaminación Muy Baja	86.1	Contaminación Muy Baja
17 Miraflores 2, Calle Héroes del Pacífico	123.4	Contaminación Muy Baja	109.9	<b>Sin contaminación</b>
18 Miraflores 3, Plaza Villarroel	122.9	Contaminación Muy Baja	99.0	Contaminación Muy Baja
19 Avenida Montes	0	<b>Contaminación Muy Alta</b>	0	<b>Contaminación Muy Alta</b>
20 Calle Manco Kápac	22.5	Contaminación Media	16.0	Contaminación Media
21 Achachicala	82.4	Contaminación Muy Baja	52.2	Contaminación Baja

*(\*) Se añadió la Avenida Montes, ya que por estudios realizados anteriormente esta zona es considerada de Muy Alta contaminación, de modo en relevamientos efectuados desde el año 1996, no se han registrado nunca líquenes en este lugar. Por lo que para la época de estudio se infirió que los líquenes fueron afectados hasta desaparecer por causa de la alta contaminación vehicular.*

Los niveles de la calidad del aire, en la mayoría de las zonas de la ciudad de La Paz, oscilan entre las categorías “sin contaminación” a “contaminación muy baja”. Lugares sin contaminación se caracterizan por el poco tráfico vehicular, ausencia de industrias y por sus grandes superficies con vegetación. En estos lugares la diversidad de líquenes es mayor, como también lo es el índice IAP (239 y 156). Áreas muy céntricas de la ciudad de La Paz, por el alto tráfico vehicular pesado, más las pocas áreas verdes, se convierten en una zona desértica de líquenes, con IAP's bajos que tienden a cero (zonas de contaminación muy alta).

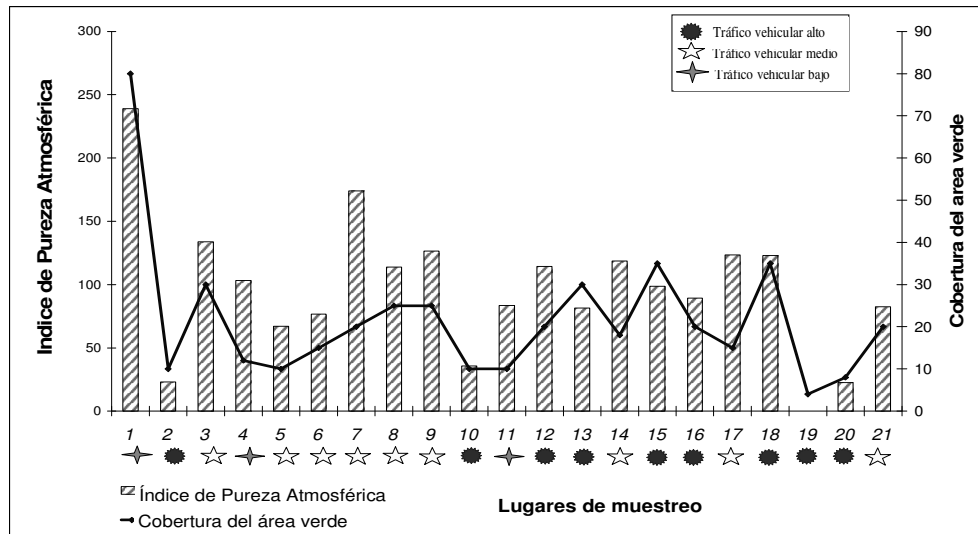
Los lugares clasificados por el método como zonas de contaminación muy baja, presentan una diversidad media en líquenes (entre 5 a 8 especies) que tienen una tolerancia alta y media a los contaminantes. La contaminación está dada por el constante tráfico vehicular liviano y fuentes fijas (chimeneas de restaurantes).

No se observa un gradiente descendente de la calidad del aire, desde las zonas residenciales del Sur hacia las zonas comerciales del centro e industriales del Norte. En todas las zonas existen lugares con IAP alto y relativamente bajo. Sólo en lugares con más fuentes de contaminación, como en la zona central (Según la tabla 2, códigos 19 y 20), el IAP baja sustancialmente. En el código 2, zona comercial de San Miguel, con alto tráfico vehicular, se tiene un valor de IAP bajo zonificado como “contaminación media” al igual que en el código 20, en el centro de la ciudad. La diferencia está dada por el tipo de tráfico, en la zona sur dominan vehículos livianos en alta cantidad y en la zona central y norte dominan vehículos pesados a diesel en mediana cantidad.

No se aplicó el método IAP en código 4 (según la tabla 2), ubicada en la zona Sur de la ciudad de La Paz con clima favorable y bajo tráfico vehicular, por la ausencia completa de las comunidades de líquenes, que puede deberse a la presencia de árboles con follaje muy bajo, (altura de 1,8 a 2 m.) que cubre la corteza de los árboles, reduce la exposición lumínica y disminuye la disponibilidad de agua, factores importantes para el desarrollo de las comunidades de líquenes.

Se observa claramente en la gran mayoría de los lugares de muestreo que en la época seca empeoran su clasificación, haciendo notar que la mayor contaminación se percibirá en la época seca.

La siguiente figura muestra que los valores de IAP no están tan relacionados con la cobertura de área verde, cómo se ha observado con la cobertura liquénica, esto debido a que se toma en cuenta tanto la cobertura como también la frecuencia de los líquenes y estos factores, como se mencionó anteriormente, son independientes uno del otro.



**Figura 9:** Índice de Pureza Atmosférica de los lugares seleccionados relacionados al área verde.

## 5 Conclusiones y Discusiones

La mayor parte de la ciudad de La Paz presenta zonas con niveles bajos de contaminación (categorías: “Sin contaminación” hasta “Contaminación Media”), lo que coincide con evaluaciones de calidad del aire efectuadas por métodos fisicoquímicos y biológicos que han reportado niveles bajos de metales (Del Granado, 2004), y de dióxido de azufre [2], uno de los contaminantes al que los líquenes presentan mayor sensibilidad.

La calidad del aire que determina la clasificación de la ciudad en zonas con diferentes niveles de polución, está directamente relacionada con la influencia de la presencia de tráfico vehicular, que también ha sido considerada como la principal fuente de emisión de contaminantes atmosféricos en la ciudad de La Paz.

En las zonas con calidades de aire con algún tipo de contaminación, bajo la influencia de intensidad alta de tráfico vehicular, se han evidenciado alteraciones en las comunidades de líquenes, siendo los síntomas más importantes la reducción de la diversidad, frecuencia y cobertura de las especies presentes y no así la relación entre líquenes foliosos y costrosos.

Los resultados han mostrado que las condiciones de calidad del aire en la ciudad de La Paz se mantienen sin muchas variaciones en las dos principales épocas del año (época seca y época húmeda). Sin embargo, en los sitios donde las emisiones vehiculares son importantes (Puntos 20 y 19), se registra un empeoramiento de la calidad del aire, donde los líquenes disminuyen su diversidad o desaparecen por completo respectivamente. Esto apoya fuertemente el hecho de que la contaminación de origen vehicular es la más importante para la ciudad, además de sugerir que la sensibilidad de

las comunidades de líquenes puede ser alta presentando alteraciones que pueden ser registradas, aún frente a variaciones de poca magnitud en los niveles de contaminación.

Las modificaciones procedimentales planteadas y que combinan las propuestas de García & Rubiano [11] y Steubing y Fangmeier [22] permitieron obtener una metodología útil y aplicable para la ciudad de La Paz, que se caracteriza por sus diferencias microclimáticas, ya que el trabajo ha demostrado, a través del factor de tolerancia (Q), que se pueden encontrar y diferenciar especies de líquenes que responden más a factores contaminantes, como el tráfico vehicular, de aquellas especies presentes en el área de estudio, pero que responden más a factores climáticos, como la reducción de la humedad relativa, que a las condiciones de stress inducidas por la contaminación.

En este contexto, la ciudad de La Paz presenta las siguientes especies altamente tolerantes a la contaminación: *Candelaria concolor*, *Physciella chloantha*, *Physcia undulata* y *Candelariella reflexa*. Entre las especies más sensibles se han registrado a *Punctelia subrudecta*, *Lepraria sp2*, *Phaeophyscia adiastrata* y *Teloschistes chrysophthalmus*. Todas estas especies parecen tener un comportamiento más influenciado por el stress generado por la contaminación que por las diferencias microclimáticas.

Los resultados obtenidos también sugieren que el índice puede utilizarse no sólo como indicador de la calidad del aire, sino también de sus componentes individuales, de modo que la diversidad, frecuencia y cobertura líquénica, que en zonas de alta contaminación disminuyen, en zonas de menor contaminación se incrementan.

Adicionalmente se ha puesto en evidencia que la cobertura es un parámetro que se encuentra relacionado con la presencia de mayor cantidad de área verde en el sitio de relevamiento, de modo que, en sitios en los que, por las características de las emisiones (alto tráfico vehicular) se esperarían niveles de cobertura bajos, por la presencia de áreas verdes que contribuyen a mejorar las condiciones de humedad y calidad del aire, por su acción como barrera natural, se tienen valores más elevados de cobertura en comparación con aquellos sitios con similares niveles de contaminación, pero con menor superficie cubierta por vegetación.

En relación con los tipos morfológicos y su sensibilidad o resistencia, los resultados concuerdan con estudios similares por cuanto se han encontrado mayormente especies del tipo folioso en la mayor parte de las zonas de estudio y que presentan niveles de contaminación medios hasta bajos. En contraposición, la presencia de líquenes fruticosos se restringe a lugares con bajo tráfico vehicular, zonas residenciales y sin actividad industrial con las mejores condiciones de microclima y calidad del aire. A pesar de que no se han muestreado todos los sitios con niveles de contaminación más crítica, por la falta de forófitos, en el Código 19 se ha registrado una zona con carencia total de líquenes (desierto de líquenes) que ha sido relacionada con la calidad de aire más baja.

El método empleado ha mostrado ser una alternativa para la evaluación integral de la calidad del aire en una zona determinada, de una manera rápida, de bajo costo y con técnicas de muy fácil aplicación.

Las principales desventajas para la aplicación del método se relacionan con la existencia de factores en los ecosistemas urbanos que influyen en la distribución de la flora líquénica, como son: la insuficiente distribución de los forófitos o substratos homogéneos para el soporte de comunidades líquénicas, la falta de áreas verdes, el tratamiento con cal de la base de los árboles, la poda exagerada y la utilización de los troncos para colgar carteles.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Harrie Sipman especialista en líquenes por su eterna colaboración.

## Referencias

- [1] Ammann K., R. Kerzig, L. Liebendorfer, M. Urech, M. 1987. *Correlation multivariée entre les dones de position de 8 différents polluants de l'air celles issues de relevés de la végétation lechenique dans une petite ville suisse*. Advances in Aerobiology. Basel.
- [2] Anze, R. 1993. *Ensayos para la utilización de líquenes del Valle de La Paz como indicadores de contaminación atmosférica por dióxido de azufre*. Tesis de Licenciatura. UMSA, La Paz-Bolivia.
- [3] Anze, R. 1996. *Propuestas para la implementación de una red de biomonitoreo para contaminación atmosférica en la ciudad de La Paz*. Tesis de Maestría. UMSA, La Paz-Bolivia.
- [4] Anze, R. 2002. *Evaluación de la calidad del aire en el Valle de La Paz*. Centro de Postgrado – Instituto de Ecología, La Paz-Bolivia.
- [5] Arndt U., W. Nobel, B. Schweizer, 1987. *Bioindikatoren – Möglichkeiten, Grenzen und neue Erkenntnisse*. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.
- [6] Arze A., H. Weeda, 1996. *Manual del arbolado urbano*. Ciudad de La Paz. Artes Gráfica Latina. La Paz-Bolivia.
- [7] De Sloover, J. 1968. *Mapping of atmospheric pollution on the basis of lichen sensitivity*. En R. Misra and B. Gopal (eds.), *Proceeding of the Symposium on Recent Advances in Tropical Ecology*.
- [8] Del Granado, S. 2004. *Evaluación de la calidad del aire en distintos puntos de la ciudad de La Paz por detección de contaminantes gaseosos (con énfasis en SO<sub>2</sub>) y metales pesados (plomo y cadmio) utilizando biomonitoreo activo con Lolium multiflorum (Gramineae) y monitoreo con filtros SAM*. Tesis de Licenciatura en Biología, UMSA, La Paz-Bolivia.
- [9] Ferre, R. 1999. *Líquenes y calidad del aire. Utilización de los líquenes como bioindicadores*. Seminario de Biología y Geología del I. E. S. "Padre Eduardo Vitoria" ALCOY Proyecto Europeo.
- [10] Franken M. & Anze R. 2001. *Guía de Laboratorio de Calidad Ambiental*. No publicado.

- [11] García, L. & Rubiano, L. 1984. *Comunidades de Líquenes como Indicadoras de niveles de Calidad de Aire en Colombia*. Cont. Amb. Volumen 8, Capítulo 13, Medellín-Colombia.
- [12] Garrett, A. 2004. *Biomonitoreo pasivo de la contaminación atmosférica por plomo y cadmio en la ciudad de La Paz mediante análisis de hojas en Populus balsamifera (Salicaceae)*. Tesis de Licenciatura, UMSA, La Paz-Bolivia.
- [13] Gast, F. 1984. *Populationsökologie und Rückstandswerte (Schwermetalle; Organohalogene) von Elster (Pica pica) zur Bewertung urbaner Ökosysteme*, Ph. D. Tesis, Universität des Saarlandes, Alemania.
- [14] Gilbert, O.L. 1973. *Lichens and air pollution*. En: V. Ahmadjian and M.E. Hale (eds.), *The lichens*. Academic Press, N.Y.
- [15] Insarov G. & Schroeter B. 2002. *Lichen Monitoring and Climate Change*. En: Nimis L., Scheidegger C & Wolseley P. (eds). *Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens*. NATO Scientific Affairs Division. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands.
- [16] Le Blanc, F. & De Slover, J. 1973. *Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal*. Canadian Journal of Botany.
- [17] Mejía, P. 1993. *Bioindicadores, algunas aplicaciones*. Ciclo de protección ambiental EPFL. Universidad Agrónoma Nacional III.
- [18] Pignata, M.L. 2002, *Curso de Empleo de Biomonitores en Estudios de Contaminación Atmosférica*. Instituto de Ecología, La Paz-Bolivia. No publicado.
- [19] Pinto, M. 2000. *Biomonitoreo de contaminación atmosférica por material particulado en árboles y arbustos ornamentales de la ciudad de La Paz*. Tesis de Licenciatura. UMSA, La Paz.
- [20] Ravera, O. 1975. *Critique of concepts and techniques regarding biological indicators*. Zool.
- [21] Schubert, R. 1982. *Select plant bioindicators used to recognize air pollution*. En: Steubing, L. and Jäger, H.J.: *Monitoring of Air Pollutants by Plants*. The Hague: Dr. W. Junk Publishers.
- [22] Steubing L. & Fangmeier A. 1992. *Monitoring of Air Pollutants by Plants*. The Hague: Dr. W. Junk Publishers.
- [23] Steubing L., Klee R. & Kirschbaum U. 1974. *Beurteilung der lufthygienischen Bedingungen in der Region Untermain mittels niederer und hoherer Pflanzen*. Staub-Reinhalt. Luft.
- [24] Steubing L. 1982. *Wirkungserhebungen Über die Verbreitung von Photooxidanten in der Region Untermain mit dem Bioindikator BEL-W-3*. Angew. Bot.
- [25] Zaballa, M. 1999. *Contaminación atmosférica en la ciudad de La Paz por deposición de polvos y metales pesados. Su distribución por el sistema de vientos locales*. Tesis de Licenciatura. UMSA, La Paz-Bolivia.