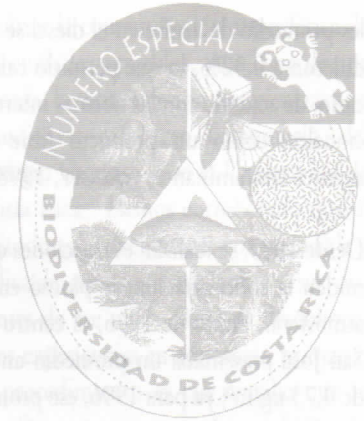


LOS LÍQUENES COMO BIOINDICADORES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA: UN SISTEMA DE MONITOREO

Víctor Hugo Méndez-Estrada*

Marta Rivas Rossi*

Julián Monge Nájera*



INTRODUCCIÓN

Tráfico vehicular,
contaminación
y salud

El número de vehículos automotores aumenta anualmente cerca de 7% en Costa Rica. En 1997, se alcanzó el medio millón, lo que constituye un valor relativamente alto para una población cercana a los cuatro millones (un vehículo por cada ocho habitantes). Estos vehículos circulan por las estrechas y congestionadas vías, aumentando las descargas de agentes contaminantes como el monóxido de carbono, el dióxido de azufre y el plomo, que son recibidos por la atmósfera. Estas sustancias ocasionan daños, muchas veces irreparables, en los ecosistemas y en la calidad de vida de los habitantes (Avenidaño, 1986; Monge-Nájera, 1994, 1996); llegan por ingestión o inhalación a la sangre de los humanos, y se almacenan en los tejidos y en órganos como los riñones, la médula ósea, los pulmones y el cerebro, donde provocan -especialmente en los niños- retardo en la calidad del aprendizaje, nefropatías (problemas en el riñón), cólicos abdominales, anemias, problemas neurológicos y reproductivos (Ander-Egg, 1984; Monge-Nájera, 1990; Moreno, s.f.).

El plomo puede llegar a producir en el ser humano, problemas oculares, retardo en la capacidad de aprendizaje de los niños, alteraciones en el sistema nervioso y respiratorio. El dióxido de azufre agrava las enfermedades del aparato respiratorio y el monóxido de carbono también provoca alteraciones broncopulmonares. Entre las principales enfermedades atribuidas a la contaminación del aire están: la bronquitis, el asma, el enfisema, el cáncer de pulmón; además, los contaminantes atmosféricos provocan que los pulmones pierdan elasticidad y disminuyan su capacidad pulmonar, lo que produce la pérdida o la disminución de la capacidad respiratoria (Alfaro, 1998; Monge-Nájera, 1990; Moreno, s.f.).

Estas descargas de agentes contaminantes a la atmósfera atentan contra los principios del desarrollo sostenible que promueven los políticos. Uno de los principios del desarrollo sostenible establece que el ser humano debe cuidar los recursos que la naturaleza proporciona, en la búsqueda de una mejor calidad de vida para todos. Esto implica obtener de ellos los bienes y los servicios que les permitan a los actuales habitantes satisfacer sus necesidades, sin que se comprometan los requerimientos de las generaciones que vienen después de nosotros (Monge-Nájera, 1994; Méndez, 1995). De acuerdo con este principio, todos los ciudadanos estamos obligados a velar porque los ac-

tuales recursos permanezcan inalterables, de manera que se garantice un espacio para cada ser vivo en este planeta. ¿Pero cómo lograr esa armonía si se están incrementando las constantes descargas de agentes tóxicos que van a dar a la atmósfera?

Durante muchos años, la producción de combustibles para uso automotor, procesados por la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), contribuyó a contaminar la atmósfera, debido a que los productos derivados del petróleo que procesaba contenían sustancias tóxicas, como las mencionados anteriormente, que al acumularse en el aire, el suelo, el agua, el follaje de las plantas y en el polvo, deterioraban la calidad de los ecosistemas y la salud de los ciudadanos (Moreno, s.f.).

RECOPE, consciente de esta problemática, inició un proceso de modernización en sus actividades y estableció políticas tendientes a mejorar la calidad de sus productos, con el propósito de contribuir a la protección del ambiente (RECOPE, 1998). Uno de los principales logros fue poner al mercado, el 24 de octubre de 1994, la *gasolina super eco oxigenada*, que reduce los hidrocarburos sin quemar y los óxidos de nitrógeno. Para 1996, se logra eliminar el plomo de las gasolinas, lo que reduce su concentración en el ambiente en 45% y en la sangre de los niños estudiados, en 74%. Para 1997, los nive-

* Centro de Investigación Académica (CIAC),
Univesidad Estatal a Distancia

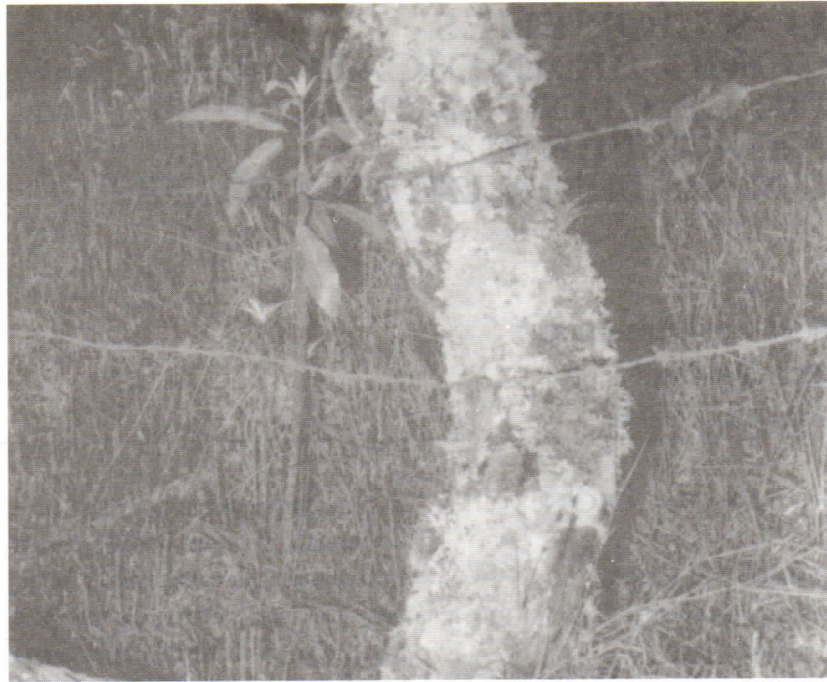
les promedio de azufre en el diesel se redujeron a 0,32%, lo que permitió calificarlo, de acuerdo con las normas internacionales, como un producto libre de agentes contaminantes (RECOPE, 1998).

Desde 1993, se realizan evaluaciones que miden la concentración de plomo en la atmósfera. Antes de 1996, el centro de San José presentaba un promedio anual de 0,73 ug/m³; ya para 1996, ese promedio disminuyó hasta 0,09 ug/m³. Se atribuyó dicha reducción a la introducción en el mercado de la gasolina *super eco* (super sin plomo) (RECOPE, 1998).

LOS LÍQUENES COMO BIOINDICADORES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

No solo a los seres humanos les afecta el estado de la contaminación atmosférica: otros seres vivos, como los líquenes, también sufren por ello. Sus poblaciones aumentan o disminuyen su densidad de acuerdo con la presencia de factores adversos en la atmósfera y llegan incluso a pagar un precio muy alto por la desmedida actividad humana, precio que incluye la muerte. Cuando la contaminación atmosférica es baja, los líquenes se desarrollan normalmente y es común observarlos viviendo sobre los troncos de los árboles o de las rocas. Cuando esa contaminación es alta, sus poblaciones disminuyen o desaparecen del todo (*una reseña histórica breve aparece en el artículo clásico de Méndez y Fournier, 1980*).

Existen cerca de 25 000 especies de líquenes distribuidas en la naturaleza, que se localizan desde el Ecuador hasta el Ártico y el Antártico. Son seres vivos compuestos, pues están formados por la asociación de un hongo (reino Fungi), generalmente ascomiceto, con un alga verde o cianobacteria (*reino Prokaryotae o Monera*; Curtis y Barnes, 1993; Jansen y Salis-



FOTOGRAFÍA DE LUIS F. R.

Existe una alta relación entre la cobertura de los líquenes sobre los troncos de los árboles y la alta contaminación atmosférica.

bury, 1988). El hongo forma una red que sirve de fijación para las algas filamentosas o unicelulares (*una explicación sencilla aparece en Grüninger y Velarde, 1985*).

De la asociación, el hongo recibe compuestos orgánicos como los carbohidratos, que el alga ha fabricado por el proceso de la fotosíntesis; por su parte, parece que el alga recibe las sales minerales provenientes del hongo o de las presentes en las sustancias diluidas. Para realizar esta captación de nutrientes, en el líquen existen diminutos poros por donde atraviesan las sustancias que provienen de esas fuentes. Los líquenes cumplen una función importante en la dinámica de los ecosistemas, pues son los primeros colonizadores de áreas rocosas desnudas, y sus actividades inician el proceso de formación del suelo (*Méndez y Fournier, 1980*).

Los líquenes son epifitos, o sea, no se desarrollan en el suelo, sino sobre un sustrato como el tronco de un árbol, las rocas o incluso las paredes, por lo que, de-

penden totalmente de los nutrientes que transporta el aire. Son muy resistentes a factores adversos del ambiente, permanecen vivos aunque se sequen y no necesitan de ninguna fuente de alimento orgánico. Requieren solo de luz solar, aire y algunos minerales que obtienen del sustrato, del aire o del agua. Están adaptados para poder absorber rápidamente sustancias del agua de lluvia, por lo tanto, son susceptibles a los componentes tóxicos transportados por esta, que se acumulan con gran facilidad en sus células vivas (*Méndez y Fournier, 1980; Grüninger y Velarde, 1985*).

A causa de lo anterior, la presencia o la ausencia de líquenes en una región constituye un elemento natural importante que ofrece información acerca del estado de contaminación de la atmósfera (*Méndez y Fournier, 1980; Grüninger y Velarde, 1985; Monge-Nájera y otros, 1999*).

Las sustancias tóxicas que se acumulan en los líquenes los obligan a romper sus mecanismos homeostáticos, reduciéndose así su capacidad fotosintética que les

permite fabricar sus propios alimentos. ¿Cómo nos damos cuenta de que un líquen ha acumulado esas sustancias tóxicas? Existen formas químicas y visuales que nos permiten determinar el estado de contaminación de la atmósfera. La primera consiste en pulverizar el líquen y someterlo a pruebas químicas. La segunda, una forma sencilla que pueden emplear nuestros estudiantes y docentes, se basa en observar las reacciones metabólicas de los líquenes, que al ir recibiendo los contaminantes reducen los procesos fotosintéticos: 1) el color verde grisáceo, característico de los líquenes, cambia a blanco, verde claro y amarillo pardo, principalmente por el efecto secundario del bióxido de azufre, que no permite la formación de los pigmentos necesarios para la fotosíntesis; 2) hay una reducción del tamaño del líquen y 3) se llega, en el peor de los casos, a su desaparición completa (Méndez y Fournier, 1980).

VIABILIDAD DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO CON ESTUDIANTES

En esta oportunidad, queremos compartir con nuestros estudiantes y docentes una experiencia que, desde 1976, ha venido llevando a cabo en Costa Rica un grupo de investigadores (Méndez y Fournier, 1980; Monge-Nájera y otros, 1999), y que ha permitido determinar los líquenes como indicadores de la contaminación atmosférica en las condiciones tropicales propias de América Latina, una de las regiones más antiguas del mundo en que se ha usado este método (medio siglo). Se espera que la experiencia motive a los profesores para que, junto con sus estudiantes, utilicen un instrumento sencillo que no requiere de conocimientos de liquenología, pero que permite aplicar el método científico para

analizar la contaminación atmosférica de sus ciudades y pueblos. A lo largo de una década, hemos realizado experiencias con estudiantes del Liceo Laboratorio, del Colegio Calazans y de la Universidad de Costa Rica. Hemos corroborado que el método es perfectamente comprensible y aplicable para los estudiantes y sus docentes de ese nivel. Aunque desconocemos experiencias en educación primaria, el procedimiento es tan sencillo que se justifica ponerlo a prueba también con estudiantes de ese nivel (Primero y Segundo Ciclos en Costa Rica).

¿CÓMO SE HACE LA MEDICIÓN Y SE APLICA EL MÉTODO CIENTÍFICO?

Para medir la cobertura de líquenes, se consideran aquellos árboles que no presentan evidencias de actividad humana como encalado, pintura, cubiertas de papel, tratamiento con plaguicidas; o daños causados por animales. En el lado donde se observa más cobertura de líquenes en cada árbol, se mide el total de líquenes que quedan bajo 100 puntos ubicados al azar en una plantilla transparente de 10 X 20 cm. La plantilla se coloca 1,60 m sobre el nivel del suelo. Es importante que los estudiantes cuenten al inicio con la guía del docente, para que aprendan a distinguir los líquenes foliosos del resto de las plantas que pueden crecer en el tronco. Es preferible usar varios árboles por sitio y emplear la cobertura promedio. Como guía de interpretación, se tienen dos opciones:

- a) Comparar la cobertura en el lugar estudiado (ejemplo, calles aledañas a la escuela) con la cobertura en un área rural de clima parecido y no muy lejana de la escuela.



ILUSTRACIÓN DE ALEXANDER CORRALES

Para medir la cobertura de líquenes en los troncos y distinguir los líquenes foliosos y otras formas vegetales se usa una cuadrícula.

b) Usar una escala ya construida si está disponible para la región. La escala para San José es: cobertura mayor de 30% atmósfera aceptable, de 20 a 29%, contaminación leve, de 10 a 19%, contaminación alta y menos de 10%, contaminación grave.

El método científico se basa en la secuencia (1) hipótesis, (2) toma de datos, (3) comparación de resultados con la predicción de la hipótesis. Los estudiantes pueden aprender a usar el método para el importante monitoreo del estado sanitario de la atmósfera que se respira en su comunidad, proponiendo, por ejemplo, la hipótesis de que la atmósfera en las calles aledañas a su escuela está libre de contaminantes químicos, en virtud de que se encuentra una cobertura alta de líquenes; midiendo la cobertura de líquenes con la plantilla y revisando si la hipótesis se rechaza. Sin embargo, no deben detenerse allí, pues, en el caso probable de que la hipótesis sea rechazada, deben, además, tomar medidas para disminuir la contaminación que les está afectando en su salud y otros aspectos de su calidad de vida.

UN CASO REAL:

MONITOREO DE 20 AÑOS DE CONTAMINACIÓN USANDO LÍQUENES EN LA CIUDAD DE SAN JOSÉ

Monge-Nájera y otros (1999) presentaron el resultado de 20 años de investigación sobre la cobertura de los líquenes en los árboles de once regiones de San José. Nosotros hemos utilizado esos datos para calcular la cobertura liquenológica (cuadro 1) y la de contaminación atmosférica, que es el dato de mayor interés desde el punto de vista del ciudadano común, en general, y del estudiante, en particular.

Se deduce que la zona de San José más contaminada es el Paseo Colón, donde

después de 1976 no hay ninguna cobertura de líquenes y el índice de contaminación es máximo ("nivel de desierto liquenológico"). Tal resultado coincide con lo informado por Méndez y Fournier (1980), quienes, además, encontraron alta contaminación en las estaciones del Barrio Los Yoses y de la antigua Fábrica Nacional de Licores. Esto es fácilmente explicable, pues es la región empleada por la flota de transporte público y particular para tener acceso a la ciudad capital desde la región occidental. De acuerdo con datos del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, MOPT (1998), en 1976, en el Paseo Colón circulaban 25 615 vehículos por día, valor que subió a 28 740 en 1986.

La zona menos contaminada corresponde a la Universidad de Costa Rica, que junto con los barrios Otoya y Don Bosco tenían valores bajos de contaminación en 1976 (Méndez y Fournier, 1980). Diez años después, los valores del plomo en los líquenes resultaron altos en Don Bosco y González Lahmann, y los de cobre eran altos en González Lahmann y Otoya (Fournier, 1993). Posiblemente, la baja contaminación en la Universidad de Costa Rica se deba a la poca afluencia de vehículos dentro de la ciudad universitaria. Hay condiciones intermedias en el Paseo Colón y en los alrededores de la

antigua Fábrica Nacional de Licores; esta última es otra de las rutas que utiliza la flota de vehículos para comunicar los populosos barrios aledaños de Guadalupe y Moravia, con San José. Según el MOPT (1998), la ruta de Guadalupe-Coronado era recorrida, en 1976, por 18 383 vehículos diarios, valor que en 1986 subió a 26 500 y en 1990 bajó a 24 270 vehículos por día.

Una disminución en el índice de contaminación coincide con las nuevas políticas de RECOPE, vigentes a partir de 1994, que promueven investigaciones científicas para medir el nivel de contaminación atmosférica provocada por los productos que la empresa distribuye. Haciendo el balance general de la tendencia a lo largo del período de 20 años considerado por Monge-Nájera *et al.* (1999), concluimos que, con excepción del Paseo Colón, la contaminación atmosférica ha disminuido. Sin embargo, esto de ninguna manera implica que la atmósfera de la ciudad de San José cumple con las normas de la Organización Mundial de la Salud. De hecho estudios independientes muestran que aún con el estado actual de cobertura de líquenes (cuadro 1), la ciudad de San José incumple los parámetros mínimos para una buena salud de sus habitantes (Ramírez, 1999).

Cuadro 1
PORCENTAJE DE COBERTURA DE LÍQUENES POR AÑO
EN ONCE REGIONES DE SAN JOSÉ, 1998.

REGIÓN MUESTREADA	1976	1986	1990	1997
Universidad de Costa Rica	44	18	23	44
Barrio Don Bosco (a. 4 y 8, c. 28)	26	2	9	50
Estación ferrocarril al Atlántico	24	32	10	21
Parque Nacional	21	13	16	33
Barrio González Lahmann	24	15	18	21
Biblioteca Nacional	20	4	11	43
Barrio Otoya	39	5	5	7
Barrio Don Bosco (a. 4, c. 28-32)	38	4	1	10
Fábrica Nacional de Licores	1	1	4	6
Los Yoses	1	1	2	6
Paseo Colón	4	0	0	0

FUENTE. Observación directa, 1998.

Agradecimientos

A la valiosa ayuda de Luis A. Fournier (Universidad de Costa Rica), María Isabel González (Universidad de Costa Rica), Werner Grüninger (Centro Educativo de Reutlingen, Alemania), Olman Ramírez (Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica) y Sieghard Winkler (Universidad de Ulm, Alemania).

Bibliografía

- ALFARO, MA. DEL R. 1998. Contaminación del aire. Emisiones vehiculares, situación actual y alternativas. San José, EUNED.
- ANDER-EGG, E. 1984. El desafío ecológico. Editorial de la Universidad Estatal a Distancia, San José.
- AVENDAÑO, A. 1986. Contaminación industrial del aire por plomo. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, San José, Universidad de Costa Rica.
- CURTIS, H.; BARNES, N. 1993. Biología. 5ta. ed. Buenos Aires, Editorial Médica Panamericana.
- FOURNIER O., L.A. 1993. Recursos naturales. San José, Editorial de la Universidad Estatal a Distancia.
- GRÜNINGER, W.; VELARDE, M. 1985. Investigación de líquenes como indicadores de la contaminación y su aprovechamiento en la educación ambiental. Revista Científica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Instituto de Investigaciones químicas y Biológicas, Universidad de Guatemala, 7.1: 34-41.
- JANSEN, W.; SALISBURY, F. 1988. Botánica. 2da. ed. México, McGraw-Hill.
- MÉNDEZ, O.; FOURNIER, L.A. 1980. Los líquenes como indicadores de la contaminación atmosférica en el área metropolitana de San José, Costa Rica. Revista de Biología Tropical. Vol. 28: 31-39.
- MÉNDEZ-ESTRADA, V. 1995. Influencia de la investigación universitaria, referida al desarrollo sostenible, en la actividad académica de la Universidad de Costa Rica. Tesis para optar al grado de Magister. Scientia en Educación. San José, Universidad de Costa Rica.
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES. 1998. Tránsito Promedio Diario. Asesoría de Planificación, Medios de Transporte. San José.
- MONGE-NÁJERA, J. 1990. Introducción al estudio de la naturaleza: una visión desde el trópico. Editorial de la Universidad Estatal a Distancia, San José.
- _____. 1994. Desarrollo sostenible en Costa Rica: historia y caricaturas. Editorial de la Universidad Estatal a Distancia, San José.
- _____. 1996. Ecología: Una introducción práctica. Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- _____; GONZÁLEZ, M.I.; RIVAS, M.; MENDEZ-ESTRADA, V.H. 1999. Twenty years of lichen cover change in a tropical habitat and its relation with air pollution. Revista de Biología Tropical, (sometido).
- MORENO, N. s.f. El plomo. RECOPE. Reducción de la contaminación del aire en Costa Rica: caso del plomo. San José.
- RAMÍREZ, A. 1999. Estudio revela alta contaminación de aire. San José también se ahoga. La Nación. San José, Costa Rica. Domingo 27 de junio: 4-5 A.
- REFINADORA COSTARRICENSE DE PETRÓLEO (RECOPE). 1998. Un nuevo rumbo ambiental 1994-1998. San José, Refinadora Costarricense de Petróleo, San José, Costa Rica.

Nota

Escala arbitraria de 0 a 10 para medir el nivel de la contaminación atmosférica; el cero indica ausencia total de contaminación y el 10, el valor máximo de la contaminación en cada una de las regiones analizadas, graficado a partir de los datos de Monge-Nájera et al. (1999) con las funciones Image V e Image H del programa IrfanView 3.2 (disponible mediante solicitud, vía Internet, a e9227474@student.tuwien.ac.at). Importante: para el estudio en el nivel escolar, no es necesario hacer tales cálculos: basta seguir la sencilla tabla que se indica en la sección metodológica. Detalle de las once zonas de San José: Paseo Colón (Av. Central. Calles 28 y 32), Barrio Don Bosco (Av. 4, calles 28 y 32); Barrio Don Bosco (Av. 4 y 8, calle 28), Barrio Otoya (Av. 9, calles 9 y 13), antigua Fábrica Nacional de Licores (Av. 3, calles 11 y 15), Biblioteca Nacional (Av. 3, calles 15 y 17), Estación del Ferrocarril al Atlántico (Av. 3, calles 17 y 19), Parque Nacional (Av. 1, calles 17 y 19), Barrio González Lahmann (Av. 0, calles 10 y 14), los Yoses y Universidad de Costa Rica, frente a las Escuelas de Bellas Artes y Educación.