



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**LÍQUENES SAXÍCOLAS COMO BIOINDICADORES
DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA
CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA
TIERRA
CON ORIENTACIÓN EN CIENCIAS
AMBIENTALES**

P R E S E N T A:

ALMA KAREN ALVA SALAZAR



**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. MARÍA DEL PILAR ORTEGA LARROCEA**

FEBRERO, 2019

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno

Alva Salazar Alma Karen
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Tierra
310057804
karen.alva@ciencias.unam.mx

2. Tutor

Dra. María del Pilar Ortega Larrocea
Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Geología
mpol@geologia.unam.mx

3. Presidente del jurado

Dra. Silke Cram Heydrich
Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Geografía
silkecram@igg.unam.mx

4. Vocal

Dr. Jorge Humberto Limón Pacheco
Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Investigaciones Biomédicas
jorgehlimon@comunidad.unam.mx

5. Suplente 1

Dr. Rodolfo Omar Arrellano Aguilar
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
omararellano@ciencias.unam.mx

6. Suplente 2

M en C Jimena Eugenia Ramírez Lynn
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
jeraly@ciencias.unam.mx

Líquenes saxícolas como bioindicadores de contaminación atmosférica en la
Ciudad Universitaria, UNAM

111 p
2019

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis fue financiada en el marco de los proyectos PAPIIT IV 200117, PAPIME-108915 de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM.

Beca “Conservación de Áreas Verdes en la UNAM” No. 438 Instituto de Ecología, Dirección General de Obras, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.

Esta tesis se desarrolló en el marco del Taller de Investigación de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra “Restauración de pedregales y valoración de servicios ecosistémicos en Ciudad Universitaria”, semestres 2016-2 y 2017-1.

A la Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (SEREPSA) por el apoyo otorgado para la realización de este proyecto.

A la Dra. María del Pilar Ortega Larrocea por la dirección y financiamiento de este trabajo.

A la Dra. Silke Cram Heydrich por el apoyo otorgado para la realización de este proyecto y seguimiento durante la realización del mismo.

A los miembros del jurado de tesis, Dres. Jorge Humberto Limón Pacheco; Rodolfo Omar Arellano Aguilar y la Mtra. Jimena Eugenia Ramírez Lynn por las valiosas contribuciones en la revisión de este trabajo.

A la M. en C. Iris Suárez Quijada por la ayuda para el uso de los equipos para el secado del material usado en este trabajo, así como el uso y registro de imágenes en los microscopios y por la vinculación con el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía.

A la M. en C. Kumiko Shimada Miyasaka del Laboratorio de Edafología Ambiental por su apoyo para la realización de la molienda de las muestras para este trabajo.

Al M.en C. Javier Tadeo León del Laboratorio de Espectroscopía Atómica por el apoyo en la digestión ácida del material vegetal y la realización de la lectura en ICP-OES de elementos traza.

Al M en E. Nestor Tunal Sánchez por su asesoría con los software para la ejecución de los análisis estadísticos y su apoyo y paciencia durante la realización de este trabajo.

A la M. en C. Abigail Díaz Armendáriz por su asesoría para realizar los cortes de las muestras de líquenes saxícolas y preservación de las mismas.

Al M. en C. Mauricio Moreno por su asesoría con el software *Image Pro Plus* con las imágenes obtenidas en microscopio.

A la Lic. María Remedios Retana Reyes y al Médico Cirujano Juan Luis Alva Ocaña por todo el apoyo otorgado a este proyecto y a lo largo de mi vida, por su confianza y dedicación. Gracias infinitas, padrinos.

A la Lic. Mariel Ester Wall Guzmán por su ayuda con la molienda y etiquetado de las muestras y por involucrarme en el proyecto Geopedregal, contagiándome con su gran entusiasmo.

Al Lic. Gustavo Alexis Godínez Aguirre por su apoyo y comprensión para la colecta de muestras. Por el aporte otorgado en todo el proceso del trabajo y por el tiempo invertido.

A la Biól. Fernanda Martínez-Báez por su apoyo y disposición para la realización de la investigación previa y el inicio de este proyecto.

A las alumnas de Taller de Investigación de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra, "Restauración de pedregales y valoración de servicios ecosistémicos en Ciudad Universitaria": Nadia Estefanía Martínez García, Diana Ixchel Fajardo Zavala Gabriela Vázquez Zacamitzin y Adriana Gómez Santana por su entusiasmo y aprendizaje sobre este trabajo.

A la Sra. Socorro Felicitas Figueroa García por todo el apoyo otorgado en este proceso y ser parte la culminación del mismo.

A la Sra. Marcela Martínez Rodríguez y la Sra. María Rosa del Refugio Amador por el apoyo y la confianza otorgada para la terminación de este proyecto.

DEDICATORIA

A mis padres:

Por ser siempre el apoyo incondicional en cualquier proyecto que he emprendido, el ejemplo de perseverancia y lucha ante las adversidades y que siempre se puede salir adelante. Por tener las palabras de aliento y motivación en nuestros fracasos y ser los primeros en gritar con emoción cuando llegamos a nuestras metas.

Mamá: por decirme que nunca me diera por vencida y que el esfuerzo, desveladas y cansancio valdrían la pena; por tu amor incondicional hacia tus hijos y ser la compañera de vida que me ha ayudado a crecer. Eres una mujer que simplemente me hace llenar de orgullo, te amo y no hay manera de devolverte tanto que me has ofrecido desde el momento en el que me tuviste en tus brazos.

Papá han pasado muchos años desde que nací, desde ese momento e incluso antes que eso, ya estabas buscando maneras de ofrecerme lo mejor. Has trabajado duro, y sin importar si llegases cansado de tu trabajo siempre tenías una sonrisa que ofrecer a tu familia. Por tu ejemplo y motivación a pesar de las adversidades siempre encuentras la fuerza para afrontarlas. Te amo, por todo lo que nos has dado papá, te mereces esto y mucho más. Eres el héroe de un hijo, pero para una hija eres su primer amor.

A mis hermanos:

Porque ustedes han sido los compañeros de travesuras, con los que he compartido momentos inolvidables donde hemos reído, peleado, discutido, bromeado y llorado; pero también hemos aprendido uno del otro. Aunque en la mayoría de las veces parece que estuviéramos en una batalla, hay momentos en los que la guerra cesa y nos unimos para lograr nuestros objetivos. Gracias por no solo ayudarme en gran manera a concluir esta tesis, sino por todos los bonitos momentos que pasamos en el proceso.

A mis amigos:

Roberto, Yini, Dalia y Gustavo, por haber participado en los eventos más importantes de mi vida, pero también en los que me he visto vencida.

Roberto, gracias por ser la persona incondicional a lo largo de esta vida; hemos crecido juntos y aprendido, no hay palabras suficientes para todo el apoyo y amistad que me has brindado desde la secundaria hasta ahora, a lo largo de estos años hemos tenido diferentes etapas y espero que nuestra amistad perdure. No

tengo las palabras para agradecerte por todo lo que has hecho por mí, y por siempre estar en el momento y lugar correcto acompañándome.

Yini; aunque estudiamos en el mismo CCH y nunca coincidimos, estoy segura de que todo pasa en el momento exacto, conocerte desde el primer día de la Universidad hasta ahora es de los mejores momentos que he tenido en mi vida, gracias por todas las risas, bromas, prácticas de campo a veces agotadoras que pasamos juntas. Gracias por todo lo que he aprendido contigo, eres la mejor amiga que he tenido.

Dalia, gracias por estar conmigo tanto en las buenas como en las malas, en mis crisis y en darme mis “cocos” cuando me lo he merecido, gracias por siempre echarme porras para terminar esta tesis y seguir esforzándome. Gracias por todas las risas y las horas hablando por teléfono de miles de cosas y encontrar inspiración para continuar con nuestros proyectos.

Gustavo, por ser durante el último año de la carrera el compañero de equipo, tareas, risas, estrés y acompañarme a tomar las muestras de líquenes. Por aprender de filosofía con la pasión que tú lo haces y por ser los científicos soñadores en cambiar el mundo y salvarlo; esperemos que algún día así suceda.

A la Universidad Nacional Autónoma de México:

Por el orgullo de permitirme ser parte de esta Institución, gracias por la oportunidad y la experiencia adquirida durante mi estancia, por ser mi segundo hogar.

A la Facultad de Ciencias:

Por ser parte de mi formación profesional otorgándome un espacio educativo y formativo; formándome no solo de manera profesional, también personal, de la manera más ética posible.

A la Dra. María del Pilar Ortega Larrocea:

Por creer en mí y depositar esa confianza para llegar hasta este momento. Por todo su apoyo incondicional, comprensión, paciencia y entusiasmo. Gracias por enseñarme con esa pasión y entrega; que cada proyecto y resultado obtenido vale la pena con dedicación y esmero. Gracias por todas sus enseñanzas que me llevaron a desempeñarme profesionalmente .

Gracias por ser una gran líder y un ejemplo de vida.

“No debemos olvidar que cuando se descubrió el radio nadie sabía que sería útil en los hospitales. El trabajo era de ciencia pura. Y esta es una prueba de que el trabajo científico no debe considerarse desde el punto de vista de su utilidad directa. Debe hacerse por sí mismo, por la belleza de la ciencia, y entonces siempre existe la posibilidad de que un descubrimiento científico se convierta en un beneficio para la humanidad.”

Marie Curie.

ÍNDICE

I. Resumen.....	8
II. Introducción.....	9
III. Marco teórico.....	10
3.1 Características de los líquenes.....	10
3.2 Estructura de los líquenes.....	11
3.3 Reproducción.....	14
3.3 Líquenes como bioindicadores.....	15
3.4 Contaminación ambiental.....	18
3.5 Calidad del aire.....	23
3.6 Índice de Pureza Atmosférica (IPA).....	23
IV. Antecedentes.....	24
V. Justificación.....	27
VI. Hipótesis.....	27
VII. Objetivo General.....	28
Objetivos particulares.....	28
VIII. Descripción del sitio de estudio.....	29
Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel.....	29
Pedregales Remanentes.....	32
Geopedregal.....	35
IX. Materiales y Métodos.....	36
1. Seleccción de sitios de muestreo.....	36
2. Determinación de la cobertura de la especie de liquen más abundante...38	
3. Recolecta y procesamiento de líquenes.....	39
4. Determinación del IPA.....	41

5. Molido y preparación de muestras.....	42
6. Digestión ácida y lectura de contaminantes.....	45
X. Resultados.....	47
10.1 Caracterización de líquenes saxícolas en diferentes microambientes...	47
10.2 Índice de Shannon-Wiener.....	47
10.3 Cobertura de líquenes saxícolas	60
10.4 Índice de Pureza Atmosférica (IPA)	61
10.5 Elementos cuantificados en los tejidos de <i>Xanthoparmelia conspersa</i> ..	62
XI. Discusión.....	69
Caracterización morfológica y abundancia por cobertura.....	69
Cuantificación de contaminantes elementales retenidos en tejido vegetal del líquen <i>añín</i> a <i>Xanthoparmelia conspersa</i>	70
XII. Conclusiones.....	74
XIII. Literatura citada.....	76
XIV. Anexos.....	89
Anexo 1. Catálogo de especies de líquenes saxícolas encontradas en la Ciudad Universitaria, UNAM.....	89
Anexo 2. Frecuencia y suma total, IPA de líquenes saxícolas encontrados en la Ciudad Universitaria.....	100
Anexo 3. Concentración (mg/Kg) de contaminantes atmosféricos totales en las muestras analizadas en el equipo ICP-OES.....	102
Anexo 4. Comparativo de medidas de calidad de aire en Mexico y Estados Unidos por medio de la Environmental Protection Agency of United States (US-EPA).....	103

I. Resumen

Los líquenes son organismos simbióticos que tiene la capacidad de absorber contaminantes atmosféricos en sus tejidos; debido a que son organismos perennes, su abundancia y presencia en distintos sitios puede variar en función de la contaminación ambiental. Por lo tanto, son bioindicadores de la calidad del aire, siendo algunas especies tolerantes y otras muy sensibles a la contaminación. En esta investigación, se evaluó a los líquenes saxícolas de distintos microambientes creciendo en los sustratos rocosos lávicos de la Ciudad Universitaria por medio de Índice de Pureza Atmosférica (IPA). Se consideraron las especies totales y su frecuencia en sitios sujetos de manera distinta a la afectación por el tránsito vehicular: Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA; Zonas Núcleo Oriente y Núcleo Poniente), Senda Ecológica, Pedregales Remanentes (Molotito de la Facultad de Ciencias, Geopedregal y el Pedregal Remanente no. 42). Se realizó una caracterización morfológica de los líquenes encontrados; el más abundante fue la especie afín a *Xanthoparmelia conspersa*. Se cuantificó la abundancia de los mismos en cuadrantes adaptados y la concentración de 18 elementos en los tejidos de esta especie a través de absorción atómica ICP-OES. Se registraron la mitad de las especies descritas para la REPSA, siendo *X. conspersa* la más abundante. La cobertura no se vio afectada por los sitios de acuerdo a su ubicación; en general, los sitios con un mayor valor de IPA se encontraron dentro de la REPSA y el Molotito de la Fac. de Ciencias. Las concentraciones mayores de algunos de los elementos cuantificados en los sitios expuestos directamente a emisiones vehiculares fueron Al, Cu, Fe, Pb, Sr, V y Zn.

Palabras clave: Índice de Pureza Atmosférica, Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, *Xanthoparmelia conspersa*, microambientes.

II. Introducción

Los líquenes son asociaciones mutualistas entre hongos y algas o cianobacterias (Hawksworth *et al.*, 2005) y recientemente descubiertas, con levaduras de hongos (Spribille *et al.*, 2016). La importancia de los líquenes radica en que cumplen varios roles en la función de los ecosistemas como: inician la pedogénesis o la formación de suelo; fijan N ambiental incorporándolo al sustrato donde se encuentran (Castro *et al.*, 1990), acumulan elementos esenciales como K, P, S en su biomasa, almacenan agua y son indicadores de contaminación ambiental (Herrera-Campos y Lücking, 2008). Los líquenes son considerados como bioindicadores debido a que son organismos cosmopolitas y no poseen una cutícula protectora; absorben fácilmente nutrimentos y contaminantes en superficie; permanecen expuestos a efectos nocivos por largos periodos y son organismos perennes (Hawksworth *et al.*, 2005).

Para estudiar los líquenes como bioindicadores y poder comparar el efecto de la calidad del aire en varios sitios, se utiliza el IPA (Índice de Pureza Atmosférica) (Le Blanc y De Sloover, 1970) que cuantifica las frecuencias de las especies encontradas en una superficie de muestreo, siendo utilizada para poblaciones de líquenes arborícolas (Ammann *et al.*, 1987). Esto parte del supuesto de que hay especies sensibles a la contaminación y otras altamente resistentes, por lo que a menor diversidad y frecuencia, mayor impacto ambiental negativo.

La Ciudad de México (CdMx) es una de las ciudades con mayor contaminación atmosférica en donde el estudio con líquenes como indicadores ha mostrado resultados (Carrillo-Padrón, 1993; Zambrano y Nash, 2000). En la CdMx aún se conservan superficies de áreas verdes que son importantes para llevar a cabo estudios de monitoreo ambiental. Dentro de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se encuentra la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), inmersa en la urbanización del sur de la CdMx. La REPSA es una Reserva urbana que provee de servicios ambientales a los universitarios y habitantes que la rodean (Nava-López *et al.*, 2009). En este ecosistema, existe una gran cantidad de líquenes epífitos y saxícolas que pueden ser útiles para

estudiar su papel como indicadores de contaminación ambiental. Mendoza-Montiel (2016) realizó un estudio con una especie arborea nativa (*Buddleja cordata*) respecto a la absorción de contaminantes foliares; su estudio demostró que en las zonas núcleo de la REPSA; que constituyen una tercera parte de la superficie del campus (Lot-Helgueras *et al.*, 2012); *B. cordata* absorbió en menor cantidad los contaminantes atmosféricos que generan los automóviles que circulan diariamente y que éstos se encontraron en mayor concentración en aquellos árboles ubicados en las zonas de amortiguamiento y pedregales remanentes dentro de la Ciudad Universitaria. Por lo tanto, es de esperarse que los líquenes presentes en pedregales expuestos a las emisiones vehiculares de manera inmediata, permitan cuantificar estos impactos con mayor precisión dada su propiedad como indicadores.

III. Marco teórico

Características de los líquenes

El término *liquen* se deriva del griego λειχεν que significa “musgo de árbol”. Los líquenes son organismos polifiléticos que se encuentran asociados de manera simbiótica (Montañez y Coutiño, 2000) entre un micobionte (comúnmente un hongo *Ascomycete* o *Basidiomycete*) y un fotobionte (alga o cianobacteria) que interactúan de forma mutualista, donde ambos obtienen un beneficio, de tal forma que generan un organismo diferente y más resistente a condiciones adversas (Hawksworth *et al.*, 2005).

Cabe mencionar que los líquenes fueron considerados durante más de 140 años con esta interacción simbiótica (hongo - agente fotosintético), pero estudios recientes han demostrado que los líquenes tienen un tercer agente que los componen taxonómicamente; este lo constituye el grupo de las levaduras basidiomicetes que se encuentran localizadas en el córtex del liquen, generando la posibilidad de que más de un hongo se encuentre involucrado en su desarrollo y crecimiento (Spribille *et al.*, 2016).

Actualmente están descritas más de catorce mil especies de líquenes, su distribución es cosmopolita, es decir, se encuentran en diferentes climas y hábitats, desde los polos, desiertos, bosques, matorrales, e inclusive en la costa. Ocupan sólo el 8% de la superficie terrestre (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003a). Son importantes debido a que forman parte para la composición y soporte de la biodiversidad, intervienen en los ciclos biogeoquímicos, en la formación de suelo, fijan y hacen disponible nitrógeno atmosférico en el sustrato, acumulan elementos esenciales como K, P y S y almacenan hasta 3000% más de su peso seco en agua. El efecto del metabolismo y de sus estructuras de adhesión llamadas rizinas, alteran las características de la corteza de los árboles, o producen la mineralización de las rocas al exudar compuestos orgánicos (Herrera y Lücking, 2008). Aún cuando los líquenes son cosmopolitas y resistentes a condiciones climáticas drásticas, su presencia puede limitarse a microambientes favorables debido a la cantidad de radiación solar, el régimen de precipitación y la temperatura. Además, influye también el tipo de roca y su textura: por ejemplo, las rocas de grano fino y fuertemente compactas permiten el establecimiento de ciertas especies de líquenes, sin embargo son más frecuentes en rocas de grano medio o grueso por soportar habitualmente comunidades de tipos foliáceos que generan mayor meteorización del sustrato rocoso.

De este modo, de acuerdo a las asociaciones que forman con el sustrato en el que se encuentran, su forma de crecimiento puede ser: epífitos cuyo crecimiento se da sobre la corteza de los árboles; saxícolas o rupícolas, que son los que crecen sobre las rocas; terrícolas, donde su sustrato es el suelo y por último, los zoobióticos que crecen sobre los tejidos de animales muertos como conchas de tortugas y/o exoesqueletos de insectos (Montañez y Coutiño, 2000).

Estructura de los líquenes

Los líquenes están formados por una estructura llamada talo, organizado en diferentes capas; éstas se denominan: 1 córtex superior, 2 algas, 3 capa medular o médula y 4 córtex inferior (figura 1). La composición del talo puede ser heterómero, donde el hongo desarrolla la mayor parte de los tejidos y delimita las

capas constituidas por las hifas del mismo, las células del alga están rodeadas por las hifas del hongo, donde forman una capa debajo del córtex superior. Los talos homómeros tienen una composición donde el fotobionte no tiene una organización estructurada y las algas están distribuidas de forma semi homogénea por toda la matriz (Cubas *et al.*, 2010). Debido a la alta diversidad morfológica de los líquenes, Carballal y cols. (2006) agruparon los tipos de líquenes de acuerdo a su crecimiento (biotipos) y la relación con el sustrato. Los principales son: folioso, costroso y fruticoso (Tabla 1).

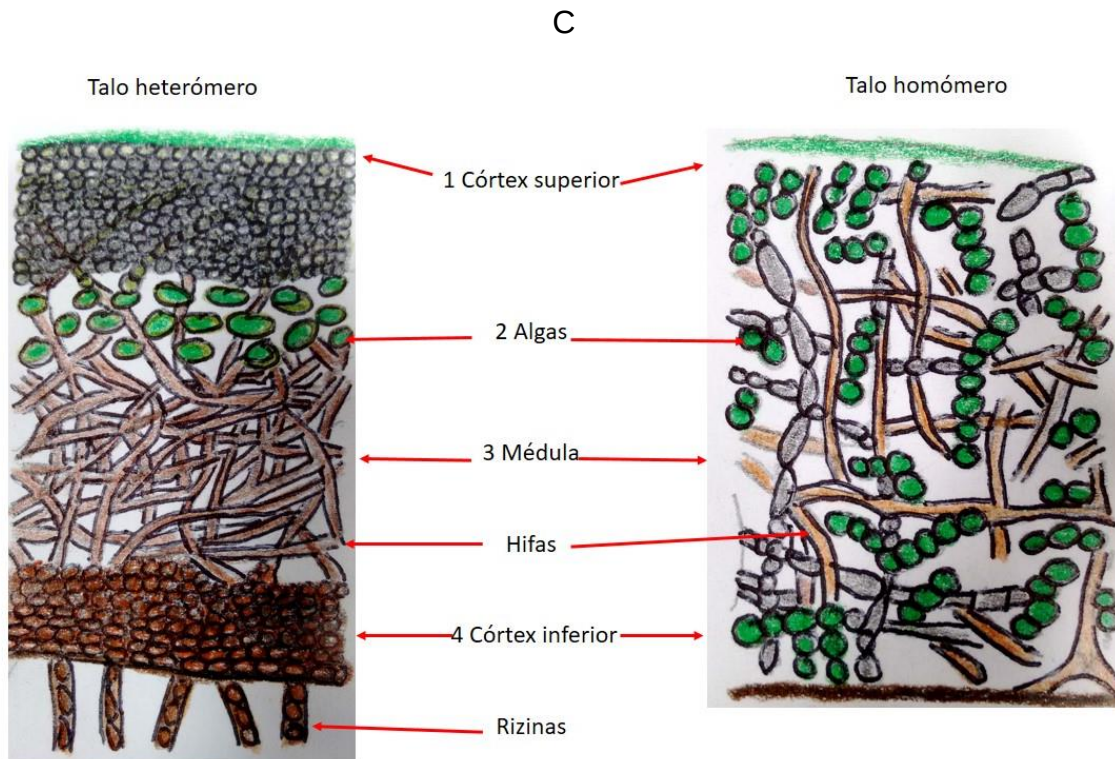
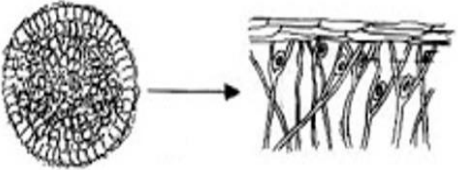
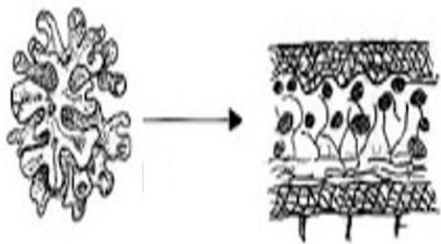
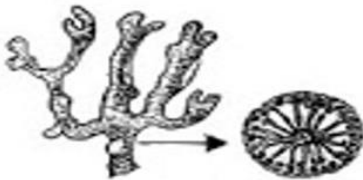


Figura 1. Estructura del talo liquenáceo. Modificado de Cubas y cols. (2010).

Tabla 1. Tipos principales de líquenes.

Biotipo	Descripción (McCune, 2009)	Ejemplo (Navarrete y Camargo, 2016)
Folioso	Son talos que alcanzan mayor tamaño y diferenciación; altamente visibles sobre los árboles, musgos o rocas. No se adhieren por completo al sustrato, solo por zonas. Tienen una forma de lámina, donde se diferencian una capa superior y otra inferior. Su variación consiste en láminas divididas en lóbulos; donde se caracterizan especies y géneros.	
Costroso	Se fijan en la superficie del sustrato siendo muy difícil desprenderlos, son visibles, de grosor variable, sobre las rocas, cortezas, suelo desnudo, etc. Es el biotipo más frecuente y tiene muchas variaciones tanto en color como en el tamaño. Se les denomina endolíticos o endofleóuticos, según el sustrato ya sean rocas o corteza de árboles. Sus variaciones están subclasificadas como: pulverulentos, continuos, lisos, verrugosos, areolados, escuamulosos, lobulados, etc.	
Fruticoso	Posee pocos puntos de fijación y contacto con el sustrato que es la principal característica de este biotipo. Son ramificados y con simetría radial. Su nombre se debe al aspecto de diminutos árboles o matorrales; son frecuentes en las ramas de los árboles. Muchos autores los llaman “talos compuestos”, son pocos géneros pero con importancia biológica muy alta. La mayoría de este talo tiene muy desarrollada la parte fruticulosa, siendo persistente.	

Reproducción

Los líquenes se pueden reproducir de manera sexual y asexual; debido a que es un organismo simbiote, el hongo es el partenaire que tiene un ciclo de vida de reproducción sexual y la del fotobionte queda restringida a la reproducción asexual.

Reproducción asexual

La reproducción asexual o vegetativa se realiza por medio de propágulos líquénicos que actúan de forma independiente del talo favoreciendo su dispersión. Las estructuras reproductivas más comunes son los soredios e isidios, siendo más representativas de los talos foliáceos y fruticulosos. Otras estructuras del hongo son los picnidios que tienen una forma globosa (figura 2).

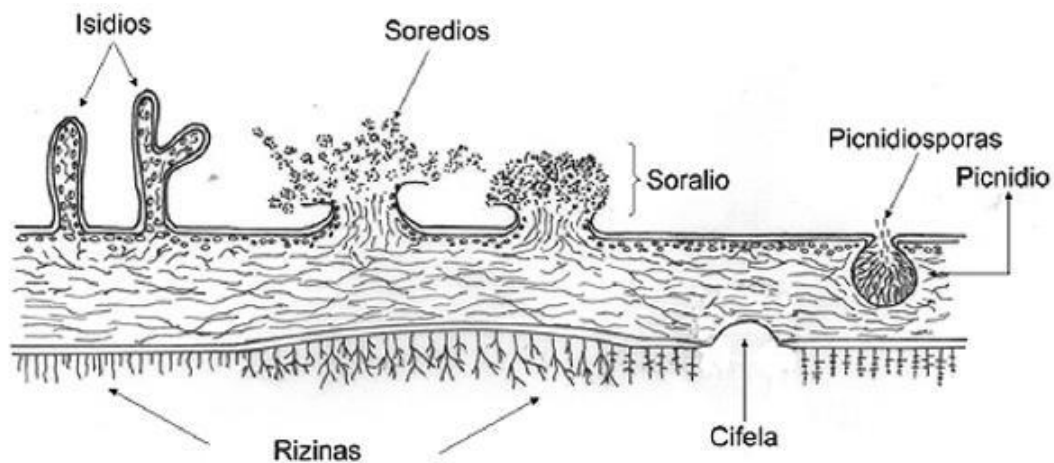


Figura 1. Corte transversal de un líquen donde se muestran algunas de sus estructuras. Tomado de Godínez y Ortega (1989).

Reproducción sexual

Las estructuras más representativas de la reproducción sexual son los *ascomas* que contienen las *ascas* que están compuestas de hifas y *ascosporas*. Los *ascomas* son estructuras perennes, que forman un patrón durante su desarrollo. Los tipos más frecuentes son los *peritecios* y *apotecios*. Los *peritecios* protegen a los *ascos* en una cavidad semiglobosa. Los *apotecios* tienen una estructura

abierta parecida a una copa o un disco y están localizados en el córtex superior o en la superficie del líquen (Montañez y Coutiño, 2000) (figura 3).

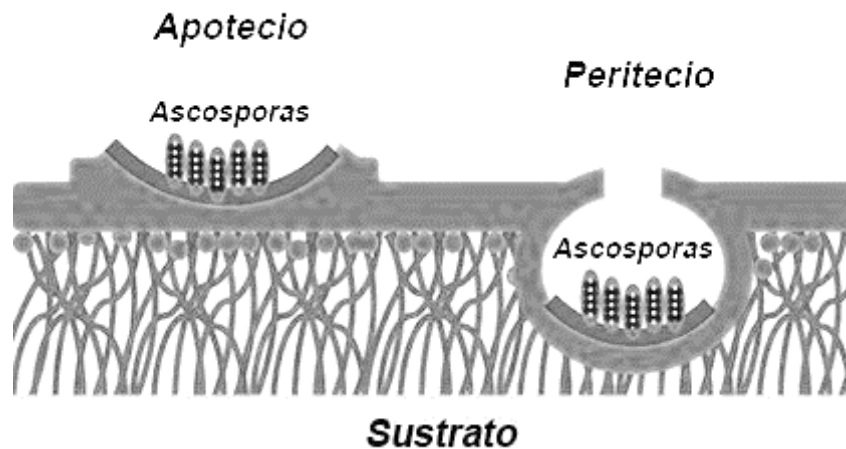


Figura 3. Corte transversal de la reproducción sexual líquénica Tomado de Lepp. (2012).

Líquenes como bioindicadores

Se puede definir a un *bioindicador* como aquel organismo o comunidad de organismos que contiene información sobre la calidad de su ambiente (Marcovecchio y Freije, 2013). Previo a esto se debe definir un *bioacumulador* ya que los seres vivos a lo largo de su vida acumulan sustancias químicas en sus tejidos con el potencial de llegar a concentraciones más altas que el medio ambiente (Bello y López de Cerrain, 2001).

Actualmente existen más de dos mil estudios publicados de líquenes como bioindicadores de contaminación ambiental, los principales son acerca de lluvia ácida, contaminación por metales pesados, derrames de hidrocarburos, radionucléidos, contaminación por derrames de dióxido de azufre, pero principalmente son utilizados como bioindicadores de cambio climático y de sucesión ecológica (Roig *et al.*, 2010).

Los líquenes fueron reconocidos como bioindicadores desde el siglo XIX, a partir de entonces se generaron varios estudios de biomonitoreo ambiental, pero a finales del siglo XX se identificó al dióxido de azufre como factor clave en su crecimiento, salud y distribución (Roig *et al.*, 2010). El dióxido de azufre es un

producto de la quema de combustibles fósiles y es uno de los componentes principales de la lluvia ácida; interrumpe la fotosíntesis y transferencia de hidratos de carbono del alga al hongo. Existen especies que son muy tolerantes a la presencia de contaminantes atmosféricos pero también se comprobó que algunos líquenes presentan una alta susceptibilidad a diferentes concentraciones, como efectos negativos en su crecimiento o inclusive su ausencia (Montañez y Coutiño, 2000). Se han identificado especies que son tolerantes a contaminantes e incluso algunos propician su crecimiento en sitios con una alta concentración de plomo y monóxido de azufre (Montañez y Coutiño, 2000).

En la década de los setenta comenzaron a realizarse estudios de los líquenes como bioindicadores y la variación de su diversidad en áreas contaminadas con diferentes índices cuantitativos que facilitan las condiciones de seguimiento y monitoreo (Hawksworth *et al.*, 2005). Los líquenes como bioindicadores se han estudiado en países desarrollados, donde la contaminación atmosférica es considerada grave para la salud, de tal forma que se ha realizado el mapeo de las especies liquenáceas que se encuentran presentes en las grandes ciudades de todo el mundo, diferenciando las zonas con un grado distinto de calidad de aire mediante la presencia o ausencia de algunas especies y la estructura de los talos de las especies más tolerantes.

La sensibilidad de los líquenes a los contaminantes atmosféricos, según Hawksworth y cols. (2005) es debida a que presentan las siguientes características:

- 1) Son organismos cosmopolitas y tienen baja presencia en los centros urbanos por el aumento de dióxido de azufre en la atmósfera.
- 2) No poseen raíces ni una cutícula protectora, por lo que su manera de adquirir nutrimentos y, por ende, contaminantes, es aérea, absorbiéndolos a través de su superficie.
- 3) Son especies relativamente longevas o perennes que pueden ser muestreadas a lo largo del año y que permanecen expuestas a efectos nocivos por largos periodos, lo que permite documentar estados crónicos

de acumulación en el tiempo y no variaciones puntuales del medio ambiente.

- 4) Son buenos indicadores porque advierten la condición del ambiente a través de su abundancia y diversidad, si el ambiente no es saludable, su abundancia y diversidad disminuyen cuando incrementa el desarrollo urbano y la actividad industrial.

Algunos estudios de líquenes como indicadores de contaminación ambiental han mostrado diferentes resultados:

País	Año	Autor	Resultados
Nueva Zelanda	2013	Kuralaratne y Freitas	<i>Parmoterma reticulatum</i> , midieron niveles de Cromo (Cr), Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Zinc (Zn) en sitios contrastantes entre ellos, (zona conservada vs áreas residenciales, comerciales e industriales) Resultados: zona industrial, concentración de metales fue más alta, seguida por zona comercial y residencial; especie es adecuada para monitorear la contaminación espacial y temporal de metales pesados.
Singapur	2006	Obbard y cols	<i>Dirinaria picta</i> en seis sitios del país, análisis de laboratorio con espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Resultados: metales provienen de la atmósfera asociados con la industria petrolera, el transporte y el tránsito vehicular, concentraciones metales se encontraron en rangos superiores a los reportados para países con climas templados.
Países Bajos	1990	De Bruin	<i>Parmelia sulcata</i> como indicadores biológicos y análisis por activación neutrónica con metales pesados. Resultados: La concentración de metales pesados provienen de materia cortical, combustión de petróleo, incineración de desechos o industria e inclusive tránsito vehicular.
Bolivia	2016	Gonzales-Vargas et al.	<i>Fraxinus americana</i> utilizando el IPA ya que está influenciada por el tránsito vehicular. Se tomaron muestras desde pie de monte hasta la planicie. El IPA arrojó valores de 23 como una calidad del aire muy buena y de 15 como calidad del aire mala.
España	2010	Bosch y cols	Líquenes costrosos como bioindicadores de calidad del aire sometidos a análisis de ICP-MS. Resultados: concentraciones de los metales de las tres especies fueron altas: 104.79 ppm de Cd; 60.37 ppm de Cu; 2.38 ppm de Mo (molibdeno); y 99.50 ppm de Sr (estroncio).

País	Año	Autor	Resultados
Argentina	2006	Santoni y Lijteroff	Conocer la existencia de contaminación aérea mediante líquenes epífitos comparando área urbana vs. área natural. Resultados: valores de IPA no fueron significativamente diferentes entre las zonas, áreas urbanas de 17 y áreas naturales de 18, por lo tanto la calidad del aire era buena para cada sitio, ya que la frecuencia y abundancia de especies liquénicas no disminuyó abruptamente.
Colombia	2016	Ramírez-Morán y cols.	Reserva Biológica "Encenillo", el efecto de la perturbación en la diversidad y composición de las comunidades de líquenes encontrando una disminución de casi la mitad en los sitios impactados identificando agregaciones o conjuntos de líquenes útiles para un monitoreo y evaluación rápida del estado de conservación de los bosques.
Costa Rica	2006	Méndez-Estrada y cols.	Métodos de bajo costo para evaluar el grado de contaminación en once sitios con zonas urbanizadas y zonas bajo protección ambiental, a través de la medida de la cobertura liquénica desde 1976 hasta 1998.

Contaminación ambiental

La contaminación ambiental es producida por factores tanto naturales como antropogénicos; estos últimos están ligados a la modificación de la composición de la atmósfera por actividades humanas, liberando grandes cantidades de contaminantes producto principalmente de la quema de combustibles fósiles. Las grandes ciudades emiten CO₂ que se produce entre otras cosas, por la combustión de los automóviles, las grandes industrias químicas y calefacciones, así como el uso de plaguicidas o productos tóxicos como ácidos o detergentes (SEMARNAT, 2003). La contaminación ambiental natural es producida por los incendios forestales, erupciones volcánicas, tormentas, terremotos, huracanes, entre otros más; pero no generan tanto impacto como los antrópicos.

El aire está contaminado cuando la presencia en la atmósfera de sustancias se da en una cantidad que implica molestias o pone en riesgo la salud de las personas y de los seres vivos en general. Los procesos que implican la combustión son principalmente dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre principalmente (Contreras *et al.*, 2013). Se ha comprobado que cuando un sitio

recupera la calidad de aire, esto es al descender los niveles de dióxido de azufre, la recolonización de especies que disminuyeron vuelve a darse de manera muy rápida. Un ejemplo conocido se dio en Londres en 1983 donde al dejar de funcionar la central térmica, las especies liquenáceas que se encontraban en los alrededores empezaron a colonizar el centro de dicha ciudad y varias especies que no se habían observado aparecieron después de 200 años (Hawksworth *et al.*, 2005).

Los líquenes también pueden absorber metales pesados disueltos en el agua y acumularlos en sus tejidos los cuales pueden ser estudiados por métodos químicos que ayuden a determinar su presencia. Un ejemplo de este estudio fue el realizado en Estados Unidos con la especie *Xanthoparmelia baltimoriensis* donde se evaluaron los niveles de plomo que aumentaron debido al tránsito vehicular con la construcción de un autopista. Los resultados sirvieron para la regulación del uso de combustible sin plomo que se pudo documentar gracias a su disminución en los tejidos de los líquenes (Hawksworth *et al.*, 2005). Los metales considerados menos tóxicos para los líquenes han sido el Hierro (Fe) y el cobre (Cu); para otros elementos como Zinc (Zn), Cromo (Cr), Cobalto (Co), Plata (Ag), Estaño (Sn), Titanio (Ti), Manganeseo (Mn) no se ha visto un efecto claro en su metabolismo. El Fe es uno de los micronutrientes que favorecen el crecimiento de varias especies líquénicas (Brightman y Seaward, 1977; Gilbert y Giarvarini, 2000): en las rocas que contienen un alto porcentaje de hierro, los líquenes ayudan a la rápida mineralización superficial, en donde se pueden apreciar costras de color marrón o marrón negruzco y el descenso del pH (Barreno-Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003b).

Los metales pesados son considerados como elementos potencialmente tóxicos, ya que en concentraciones relativamente bajas afectan a los seres vivos. La primera Norma Oficial Mexicana sobre la salud ambiental apareció en 1993, NOM-026-SSA1-1993 que establece: "Salud ambiental. Criterio respecto al Plomo (Pb). Valor normado para la concentración de Pb en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población". Esta norma surgió dados los efectos

negativos de la gasolina con plomo, el cual era utilizado como aditivo antidetonante para asegurar el rendimiento del combustible e incrementar la potencia del motor. Posteriormente, se dio a conocer que el Pb es potencialmente tóxico para los seres humanos, ya que se encontró en el aire y, este se incorpora al organismo por dos principales vías: digestiva donde se absorbe en un 10%, y vía respiratoria con la que se absorbe un 40%. Es así como la Secretaría de Desarrollo Social estableció un método de medición y determinación de la concentración de Pb en el aire del ambiente. Actualmente, existen diferentes Normas Mexicanas que regulan algunos contaminantes que se pueden presentar en diferentes sustratos ya sea en el agua tanto potable como residual; en el suelo, en sistemas de riego de cultivo; lodos y biosólidos. En el caso de los metales pesados, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) en el capítulo dos trata sobre la prevención y control de la Contaminación de la Atmósfera.

Los contaminantes que son considerados como metales pesados potencialmente tóxicos para los seres humanos son: Mercurio (Hg), Pb, Cadmio (Cd), Talio (Tl), Cu, Zn y Cr. También se incluye a los metales o metaloides ligeramente tóxicos al: Berilio (Be), Aluminio (Al) y Arsénico (As). Los límites de emisión para As, Ni, Pb, Cr y Zn son de 0.7 mg/kg y 0.007 del Cd, medidos anualmente por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) o alguna técnica equivalente (NOM-040-ECOL-2002). Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud (2005) ha descrito los metales pesados potencialmente tóxicos y sus efectos a la salud descritos en el Tabla 2.

Tabla 2. Algunos efectos negativos de contaminantes atmosféricos según la Organización Mundial de la Salud (2005).

Elemento	Efecto en la salud
Arsénico	La exposición prolongada al arsénico inorgánico, principalmente a través del consumo de agua contaminada o comida preparada con esta y cultivos alimentarios regados con agua rica en arsénico puede causar intoxicación crónica. Los efectos más característicos son la aparición de lesiones cutáneas y cáncer de piel.
Cadmio	El cadmio tiene efectos tóxicos en los riñones y los sistemas óseo y respiratorio; además, está clasificado como carcinógeno.
Cobalto	La exposición a niveles altos de cobalto puede producir efectos en los pulmones y el corazón. También puede producir dermatitis. La exposición a altas cantidades de radioactividad emitida por el cobalto puede dañar las células en su cuerpo. Aunque es improbable que ocurra, también puede provocar náusea, vómitos, diarrea, hemorragia, coma y aun la muerte.
Cobre	Exposiciones de largo periodo al cobre pueden irritar la nariz, la boca y los ojos y causar dolor de cabeza, de estómago, mareos, vómitos y diarreas. Una toma grande de cobre puede causar daño al hígado y los riñones e incluso la muerte.
Cromo	La gente puede estar expuesta al cromo a través de respirarlo, comerlo o beberlo y a través del contacto con la piel con Cromo o compuestos del mismo.
Níquel	La toma de altas cantidades puede desarrollar cáncer de pulmón, nariz, laringe y próstata, enfermedades y mareos después de la exposición al gas de níquel, embolia de pulmón, fallos respiratorios, defectos de nacimiento, asma y bronquitis crónica, reacciones alérgicas como son erupciones cutáneas, mayormente de las joyas y desordenes del corazón.
Plomo	El plomo puede alcanzar el cerebro, el hígado, los riñones y los huesos, se deposita en dientes y huesos donde se va acumulando con el paso del tiempo. No existe un nivel de exposición al plomo que pueda considerarse seguro.
Silicio	El silicio irrita la piel y los ojos por contacto. Su inhalación causa irritación de los pulmones y de la membrana mucosa. La irritación de los ojos provoca lagrimeo y enrojecimiento que junto con la formación de costras y picores son características de la inflamación cutánea.
Vanadio	Los efectos graves del Vanadio son irritación de pulmones, garganta, ojos y cavidades nasales. Otros efectos cuando se ingiere son: daño cardíaco y vascular, inflamación del estómago e intestinos, daño en el sistema nervioso, sangrado del hígado y riñones, irritación de la piel, temblores severos y parálisis, sangrado de la nariz y dolor de cabeza, mareos y cambios de comportamiento.
Zinc	Cuando la gente absorbe demasiado Zinc puede experimentar una pérdida del apetito, disminución de la sensibilidad, al sabor y al olor, pequeñas llagas y erupciones cutáneas. La acumulación del zinc puede incluso producir defectos de nacimiento.

La regulación internacional normada por la Environmental Protection Agency de los Estados Unidos (US-EPA) determina las concentraciones de los elementos que se consideran normales y las que se consideran tóxicas para los seres humanos (Tabla 3).

Tabla 3. Concentraciones tóxicas para algunos elementos según la EPA y un ejemplo de su contenido en partículas atmosféricas (PM) (Viana-Rodríguez, 2003).

Elemento	Concentración normal	Concentración tóxica	PM_{2.5} (ng/m³)	PM₁₀ (ng/m³)
Al	n.d.	n.d.	0.5*	1.83*
As	n.d.	100 µg/m ³	1.0	1.4
Ba	n.d.	500 mg/kg	9	40
Cd	0.005 µg/m ³	5 µg/m ³	0.6	0.7
Co	n.d.	n.d.	0.3	0.4
Cr	0.1-5 mg/kg	5-30 mg/kg	3	9
Cu	5-30 mg/kg	20-100 mg/kg	31	47
Fe	0.5-50 mg/kg	20-40 mg/kg	0.28	1.04
Li	200-2 mg	2-10 mg	0.2	0.7
Mn	30-300 mg/kg	400-1000 mg/kg	10	23
Ni	0.1-5 mg/kg	10-100 mg/kg	5	8
P	50 mg/kg	1 mg/kg	0.04	0.07
Pb	5-10 mg/kg	30-300 mg/kg	40	59
Si	n.d.	n.d.	1.5**	5.5**
Sr	n.d.	4 milirems	2	6
Ti	n.d.	10-100 µg/mL	26	85
V	5-10 mg/kg	27-150 mg/kg	10	16
Zn	n.d.	100-400 mg/kg	55	94

n. d. = no determinado, *Al₂O₃, **SiO₂

Calidad del aire

La calidad del aire es el indicador de la salud de un ecosistema o lugar determinado donde se tengan las condiciones adecuadas para que el aire sea respirable para los seres humanos (es decir, la composición de gases naturales de una atmósfera). La calidad del aire ha ido en deterioro debido a que los contaminantes atmosféricos han ido en aumento por la quema de combustibles fósiles, generando un riesgo ambiental para la salud en América. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó que para el 2016, una de cada nueve muertes en el mundo fue resultado de condiciones relacionadas con la contaminación atmosférica. Los principales efectos de la calidad del aire sobre la salud son enfermedades cardio-respiratorias, aumento de casos de asma e infecciones respiratorias y algunos tipos de cáncer.

Las principales emisiones de contaminantes provienen del transporte ineficiente, en la Ciudad de México y provoca que se consuman grandes cantidades de combustible que son emitidos a la atmósfera, convirtiéndose en Gases de Efecto Invernadero (GEI). Los principales contaminantes que son primordiales para monitorear la calidad del aire en los centros urbanos son el dióxido de azufre (SO_2), partículas suspendidas (PM_{10}), dióxido de nitrógeno (NO_2), Ozono (O_3) y monóxido de carbono (CO) (Centro Mexicano de Derecho Ambiental, 2017).

Índice de Pureza Atmosférica (IPA)

El Índice de Pureza Atmosférica es un análisis cuantitativo que fue evaluado por Ammann y cols. (1987) y Liebendoerfer y cols. (1988) como un método para evaluar la calidad del aire con líquenes. Se realiza a través del número de especies presentes en un sitio y la disminución de otras debida a la sensibilidad de dichas especies a ciertos contaminantes ambientales (Santoni y Lijteroff, 2006). La fórmula del Índice de Pureza Atmosférica utiliza la frecuencia como parámetro de bioindicador y aporta datos sobre la cobertura líquénica y diversidad de especies; también es identificado en la literatura como "*Lichen Biodiversity*" (LB) (Ferretti *et al.*, 2004). Nimis y cols. (1990) utilizaron el IPA propuesto por Ammann y cols.

para monitorear el SO₂ bajo diferentes condiciones climáticas. La ecuación para cuantificar el IPA se obtiene a partir de la sumatoria de las frecuencias de cada una de las especies de líquenes presentes dentro de una gradilla de muestreo (Le Blanc y De Sloover, 1970).

IV. Antecedentes

Existen muchos estudios de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica a nivel mundial, enfocados en los líquenes epifitos en ecosistemas boscosos, ya que son sitios donde se concentran de forma natural y sin perturbación. La mayor parte de fuentes emisoras de contaminación son vehiculares o de quema de basureros a cielo abierto, emisiones de fábricas, centrales térmicas y refinerías (Cepeda y García, 1998; Asta *et al.*, 2002; Jeran *et al.*, 2002; Budka *et al.*, 2004; Froehlich, 2006; Giordani, 2007; Cristofolini *et al.*, 2008; Fuga *et al.*, 2008; Policnik *et al.*, 2008).

En Latinoamérica, se han hecho estudios en ciudades como Bolivia (Anze *et al.*, 2007), Perú (Bedregal *et al.*, 2005), Colombia (García y Rubiano, 1984), Argentina (Lijteroff *et al.*, 2009), Venezuela (Rojas-Fernández *et al.*, 2008) y Guatemala (Cohn-Berger, 2014), entre otros. En México, los estudios realizados reportan en su mayoría descripciones taxonómicas o catálogos descriptivos de las especies de líquenes por localidad, por los géneros y familias; así como el tipo de sustrato y tipo de talo que presenten. México es uno de los países megadiversos en climas y tipos de vegetación, por lo tanto, el número de especies de líquenes quizás alcance las 5 000 (Herrera-Campos *et al.*, 2014); sin embargo, los estudios sobre contaminación, usando a los líquenes como bioindicadores son pocos.

En Morelia, Michoacán se analizaron líquenes cortícolas en áreas urbanas y suburbanas de esta ciudad; tanto en árboles nativos como introducidos en avenidas y áreas verdes donde se dio a conocer un listado de 49 especies diferentes en 26 géneros y 10 familias (Gregorio *et al.*, 2016).

González y Tenorio (1993) utilizaron los géneros *Parmotrema* sp. y *Parmelia* sp. para monitorear la calidad del aire del Área Metropolitana de la CdMx: se tomaron

muestras de las especies cada tres meses en cuatro puntos de los alrededores del área urbana (N, S, W, E) y como referencia un sitio de control lejos y libre de la influencia de la ciudad. Se tomaron valores de acumulación de metales y nutrientes en periodos de tiempos conocidos (Pb, Cr, Cu, Fe, Zn, Cd, K y Ca). Los resultados mostraron que los líquenes que crecen cercanos al área urbana presentan valores más altos en la parte sur de la ciudad que presenta los vientos dominantes aún cuando la parte norte es la más contaminada.

En 1999, Zambrano y cols. utilizaron las especies *Usnea ceratina* y *Everniastrum neocirhatum* para transplantarlas en un bosque de *Abies* cercano a la CdMx y conocer la capacidad de supervivencia de las mismas frente a condiciones naturales. Como resultado, en los alrededores de la CdMx, se tuvo un efecto negativo respecto al rendimiento fisiológico en relación con el control que se situó a 100 km al N de la CdMx. La especie *U. ceratina* fue la que presentó menor sensibilidad a la degradación de la clorofila, mostrando que los niveles de contaminación por ozono (O₃) y SO₂ presentan efectos fisiológicos en los líquenes.

Zambrano y Nash (2000) realizaron un estudio en el Desierto de los Leones en la CdMx el cual consistió en transplantar líquenes de las especies *U. ceratina* y *E. neocirhatum* durante 54 días para conocer la capacidad fotosintética neta máxima. Encontraron que disminuyó un 30% respecto al control, afectando la degradación de la clorofila b debido a las concentraciones de O₃, se observó que los líquenes presentaron lesiones como cambio de coloración y tamaño. Debido a que el O₃ es un gas que se encuentra de manera natural en nuestra atmósfera, si los niveles son muy altos, puede provocar lesiones en los tejidos foliares, principalmente en los que se encuentren cercanos al paso de automóviles (Tapia y Andrade, 2011).

En el 2002, Zambrano y cols. publicaron que los líquenes son especies que presentan mucha sensibilidad a los contaminantes, al documentar que la presencia de los mismos disminuyó considerablemente en las ciudades a mediados de los noventa debido principalmente a los niveles de SO₂, O₃, óxidos de nitrógeno (NO_x), fluoruros y metales pesados.

Aspiazu y cols. (2007) estudiaron el efecto de los NO_x, SO₂, CO y algunos metales pesados (Ti, V, Cr, Co, Ni, Mn, Cu y Zn) en el Valle Metropolitano de la Ciudad de México proveniente de industrias químicas, silúrgicas, fundiciones de hierro, textiles, minería, papel, plásticos, nutrición, asfalto, aceites, cemento, petroquímica y de los tres millones de automóviles. Encontraron que en época seca, la deposición de Ti, Mn, Cu y Zn es uniforme y en época lluviosa la de Ti, V, Cr, Co y su concentración en líquenes varió poco.

En la Ciudad Universitaria de la UNAM en la Ciudad de México, que presenta un afluente de 166 474 personas, según Zambrano y cols. (2016) se calcula que los automóviles que circulan diariamente son aproximadamente 70 000. Debido a este impacto, Mendoza-Montiel (2016) realizó un estudio en árboles de tepozán (*Buddleja cordata* Kunth) que es uno de los más abundantes y de mayor importancia ecológica del sur de la CdMx, en el que demostró que las concentraciones de elementos contaminantes fueron menores en aquellos que creían en las zonas núcleo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) en relación con aquellos que crecieron en los pedregales inmersos en las zonas urbanizadas. Este es uno de los antecedentes directos que demuestra el papel que tiene la vegetación en la retención de contaminantes foliares que además se incorporan en otros compartimentos como el suelo al ser defoliadas las hojas y se incorporan a la materia orgánica de manera estacional. Sin embargo, no se tienen estudios sobre la absorción de contaminantes en especies perennes como los líquenes.

El único antecedente directo realizado con líquenes en la REPSA es la descripción de Herrera-Campos y Lucking (2008) de las especies tanto epifitas como saxícolas más abundantes en el matorral xerófilo de palo loco (*Pittocaulon praecox*). Se recopiló una lista de 30 especies de los órdenes Lecanorales, Candelariales y Teloschistales; el más abundante Lecanorales. De las familias representadas correspondieron a Candelariaceae, Lecideaceae, Teloschistaceae, Physciaceae y Parmeliaceae; esta última incluye a los cuatro de los doce géneros encontrados:

Canopamelia, *Fluvopunctelia*, *Punctelia* y *Xanthoparmelia*; que presenta el mayor número de especies totales encontradas de las que fueron recolectadas.

V. Justificación

El impacto antropogénico que ocurre en la Reserva Urbana del Pedregal de San Ángel, ha sido cuantificado a través de diversos indicadores. Sin embargo, aunque los líquenes han sido reconocidos mundialmente como organismos clave en la medición de la calidad del aire, en este ecosistema no existe todavía ningún registro que permita conocer su papel o el impacto que ha tenido la contaminación urbana en ellos. Tampoco existen estudios detallados sobre si su abundancia y distribución es distinta en diferentes microambientes o sitios con distinto grado de exposición a emisiones vehiculares dentro del campus. Además, todos los estudios existentes sobre metodologías para la cuantificación de diversos parámetros de medición en estos organismos, están desarrollados para líquenes epífitos y no para líquenes saxícolas. Dado que una gran superficie de los líquenes que crece en el ecosistema de la REPSA y pedregales remanentes lo hace sobre la superficie basáltica, el desarrollo de una metodología para registrar distintas variables merísticas, es además necesaria para evaluar su efecto amortiguador en la provisión de servicios ecosistémicos que brindan.

VI. Hipótesis

Dado que los líquenes son perenes y ubicuos, que crecen de manera abundante como organismos saxícolas en el ecosistema de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), se plantea que, tanto su abundancia en cobertura, como su composición de especies y absorción de elementos estará influenciada en parte por el impacto antropogénico relacionado con la calidad del aire circundante, siendo menor en cobertura y riqueza en aquellas zonas con una mayor exposición y mayor en su concentración de elementos contaminantes en sus tejidos.

VII. Objetivo General

Evaluar a los líquenes saxícolas como bioindicadores de contaminación atmosférica en la Ciudad Universitaria por medio de la abundancia, composición y absorción de elementos contaminantes muestreados en dos microambientes de distintos pedregales en la Ciudad Universitaria de la UNAM.

Objetivos particulares

- Caracterizar a los líquenes saxícolas en diferentes microambientes y determinar su diversidad por medio del índice de Shannon-Wiener.
- Adecuar una metodología para realizar un levantamiento y caracterización de líquenes saxícolas con base en un método de líquenes arbóricolas.
- Cuantificar el Índice de Pureza Atmosférica (IPA) en los sitios seleccionados.
- Cuantificar la concentración de algunos elementos contaminantes (metales potencialmente tóxicos) en la especie de liquen más abundante en dos microambientes contrastantes.

VIII. Descripción del sitio

Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel

Ubicación geográfica

La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) se encuentra ubicada al sur de la Ciudad de México dentro de la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México. El campus cuenta con 730 ha de extensión; de éstas, sólo 237.3 corresponden a la REPSA que se encuentra localizada entre las coordenadas $19^{\circ}18'21''$ – $19^{\circ}20'11''$ N y $99^{\circ}10'15''$ – $99^{\circ}12'4''$ W en la Alcaldía Coyoacán (figura 4), con intervalos altitudinales de 2 292 a 2 365 msnm (Castillo-Argüero *et al.*, 2007).

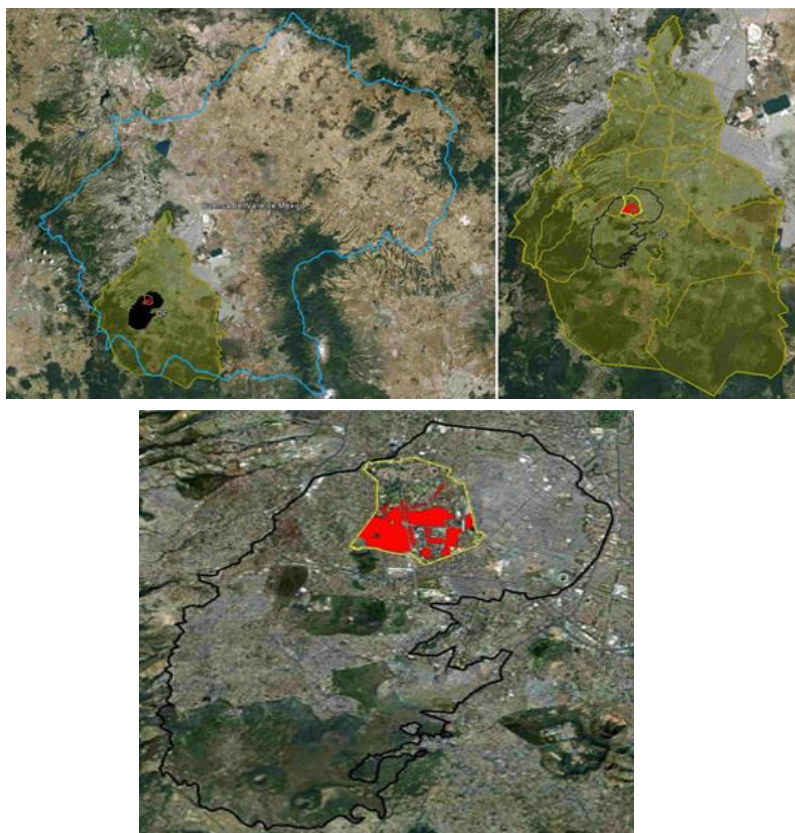


Figura 4. Imágenes de Google Earth donde se indican las poligonales de la Cuenca de México (azul), el Distrito Federal (verde), el Pedregal de San Ángel (negro), Ciudad Universitaria (amarillo) y la REPSA (rojo). En las imágenes el Norte está hacia arriba (Tomado de www.repsa.unam.mx).

Clima

El clima de la región es templado subhúmedo con régimen de lluvias en verano [Cb (w1) (w)] (García, 2004). La precipitación promedio anual es de 833 mm y se tienen dos temporalidades marcadas, una de lluvias (junio a octubre) y otra de secas (noviembre a mayo). La temperatura media anual es de 15.6 °C.

Suelo

El suelo se ha descrito como un Leptosol hiperesquelético (Siebe *et al.*, 2016) que se ha formado a partir del derrame de lava del volcán Xitle (Rzedowski, 1954; Cano-Santana, 1994). La profundidad varía entre los 0 a 30 cm, con promedio de 4.5 cm (Santibáñez-Andrade, 2005). Su textura es arenosa-limosa con bajo contenido de fósforo y nitrógeno disponibles, así como de potasio y calcio. El pH es ligeramente ácido (5.4 ± 0.1 a 6.3 ± 0.2) (Rzedowski, 1954; Martínez-Mateos, 2001).

Vegetación

La mayor parte de la superficie de la REPSA corresponde al ecosistema de matorral xerófilo, esta fue descrita por Rzedowski (1954) como *Senecionetum praecosis*, haciendo alusión al anteriormente denominado *Senecio (Pittocaulon) praecox*. Dicha especie era la predominante en la vegetación de esa época. Aunque se ha considerado como un matorral xerófilo abierto, la altitud en la que se desarrolla y la peculiaridad del sustrato (basalto), no permite que se establezca una comunidad típica ya que domina el estrato herbáceo (Rzedowski, 1954; Rzedowski y Rzedowski, 2001). En la temporada de lluvias, la cubierta vegetal puede llegar a ser muy cerrada, en algunos microambientes como son los sitios planos o las hondonadas (Castillo-Argüero *et al.*, 2004). Se han realizado listados taxonómicos donde se ha compilado una base de datos que contiene a todas las especies reportadas para la REPSA con un registro de 1 849 especies de las cuales 317 son exóticas.

Geología

El Pedregal de San Ángel y la mayor parte de la Ciudad Universitaria están cubiertos por roca basáltica proveniente del volcán Xitle; este basalto está compuesto por calcio-alcálico y andesitas basálticas (Delgado *et al.*, 1998). Fries (1960) definió el grupo del campo volcánico del Chichinautzin del cual forma parte el volcán Xitle, como flujos de lavas, brechas y camas de tobas con composición del basalto andesítico. El volcán hizo erupción hace 1670 ± 35 años Antes del Presente (AP) donde tuvo varios procesos eruptivos aproximadamente por 10 años. Estos periodos eruptivos cubrieron aproximadamente 70 km², área que ocupó desde el volcán al sur de la CDMX, hasta lo que hoy se conoce como Miguel Ángel de Quevedo (Siebe, 2009).

En la Ciudad Universitaria, la superficie del Pedregal tiene una forma muy accidentada e irregular que corresponde a la solidificación de la lava tipo *pahoehoe*; ésta presenta formas caprichosas como son acordonadas, fragmentos torcidos de lava y surcos acordonados, vesicularidades y oquedades; así como derrames compactos, masivos y vesiculares en la parte superior de la Ciudad Universitaria (Enciso de la Vega, 1994). El espesor de las lavas basálticas del pedregal varía entre los 50 cm hasta sobre pasar los 40 m. La mayor parte de las lavas de CU, tiene una dirección general de flujo 60°NE y cuyo enfriamiento correspondió a lavas desarrolladas por un tipo de erupción lenta y fluida (Enciso de la Vega, 1994).

Schmitter (1953) realizó un estudio petrográfico de las lavas de Pedregal de Ciudad Universitaria, donde los minerales predominantes son olivino con augita y apatita. Negendank (1972) clasificó una muestra de basalto de Ciudad Universitaria como andesita de olivino, sin considerar el índice de color. Badilla (1977) realizó otro estudio petrográfico donde clasificó las lavas del Pedregal como lavas de basalto de olivino y piroxeno. En el Tabla 4 se muestran los minerales que componen a las lavas del Pedregal (Enciso de la Vega, 1994).

Tabla 4. Estudios petrográficos que se han llevado a cabo en las lavas del Pedregal de San Ángel en Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México.

	Schmitter 1953 (%)	Negendank 1972 (%)	Badilla 1977 (%)
SiO₂	51.02	50.65	49.6
TiO₂	1.77	1.30	1.00
Al₂O₃	15.69	16.45	22.00
Fe₂O₃	10.00	0.75	0.63
FeO	0.00	8.00	7.90
MnO	0.14	0.23	0.09
MgO	8.49	9.26	3.25
CaO	7.68	7.56	8.52
Na₂O	3.63	3.90	4.03
K₂O	1.17	1.35	0.83
P₂O₅	0.10	0.25	0.76
H₂O	0.00	0.26	-
Total	99.69	100.06	98.61

Pedregales Remanentes

En la Ciudad Universitaria se encuentra la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) la cual se encuentra dividida por Zonas Núcleo, Zonas de Amortiguamiento y pedregales remanentes. Estos últimos no se encuentran bajo protección de la Secretaría Ejecutiva de la REPSA que es el órgano universitario encargado de su administración y cuidado; ya que son los relictos que están cercanos a las Facultades o Insitutos de la CU. Algunos pedregales son considerados como zonas de amortiguamiento de la propia reserva (Lot-Helgueras *et al.*, 2012) y otros son pedregales que quedan circunscritos en diversos terrenos de las distintas dependencias universitarias. Aunado a esto y la preservación del ecosistema nativo de la CU, se creó el Programa de Adopción de Pedregales (2013) (figura 5) donde el propósito es promover que las dependencias y entidades universitarias que cuentan con un pedregal y sobre todo aquellas que se

encuentran cercanas a la reserva, los adopten de manera voluntaria y permanente, encargándose de su cuidado y preservación (Lot, 2008).



34 **Figura 5.** Plano de Ciudad Universitaria, pedregales remanentes y áreas de la REPSA. Numerados en marzo de 2012 (Tomado de www.repsa.unam.mx).

Geopedregal

Un ejemplo de estos pedregales remanentes es el Geopedregal, ya que forma parte del Programa de Adopción de Pedregales Remanentes (pedregal no. 204) y está sujeto a restauración ecológica bajo varios proyectos de investigación desde el año 2012 en el que fue adoptado por los Institutos de Geología y Geografía (figura 6). El objetivo del Geopedregal es realizar la rehabilitación a corto plazo cuantificando algunos de los servicios ecosistémicos que brinda y que permitan realizar una restauración ecológica que considere no solamente la diversidad de las especies si no también sus funciones (Ortega-Larrocea, 2013).

El Geopedregal posee un área de 3052 m², su principal característica es que contiene todos los microambientes descritos para la REPSA: sitio plano, que cubre la mayor parte del sitio y se encuentra en la parte central del mismo, una pared que se encuentra en la parte Noroeste, dos promontorios, uno de ellos al Sur y otro al Norte, una hondonada central cerrada, una hondonada abierta al Este, grietas y oquedades de diferentes tamaños situadas en todo el sitio (Wall, 2017).



Figura 6. Ubicación de uno de los sitios de estudio (Geopedregal) en el campus de la Ciudad Universitaria de la UNAM, Ciudad de México. Imagen adquirida por Peralta, 2015.

IX. Materiales y Método

Durante los meses de julio a diciembre del 2016, se realizó un estudio previo de los líquenes saxícolas en el Geopedregal ubicado a un costado del circuito exterior y un sitio dentro de la zona núcleo de la REPSA. Se evaluó la presencia y abundancia de líquenes en diversos microambientes como pared, hondonada, grieta, sitio plano y promontorio Posteriormente se identificaron el tipo de talo, la forma de crecimiento, las estructuras reproductivas y el color; así como los sitios donde una especie haya sido la más abundante en todos los microambientes. Para ello se encontró que *Xanthoparmelia conspersa* es la especie más abundante.

1. Selección de los sitios de muestreo

Se seleccionaron seis sitios de muestreo de acuerdo a su cercanía a la emisión de combustión de automóviles que circulan en la Ciudad Universitaria. Como sitio control o menos impactado, se eligieron dos puntos dentro de la zona núcleo Poniente de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Los sitios con impacto vehicular moderado fueron el Geopedregal en el Circuito de la Investigación Científica; el Sendero Ecológico (ubicado a un costado del museo de las ciencias Universum), la Zona Núcleo Poniente del Jardín Botánico (ubicado a un costado del Instituto de Biología) y el pedregal conocido como el “Molotito” de la Facultad de Ciencias. Por último, el sitio con mayor impacto vehicular fue un camellón ubicado a un costado de la Avenida Insurgentes Sur (a un lado de la estación Ciudad Universitaria del Metrobús) (Figura 7). El muestreo en cada sitio se realizó en la temporada de lluvias (mayo a octubre) para calcular la biomasa y el Índice de Pureza Atmosférica. Cabe destacar que no se midieron los mismos micrambientes en todos los sitios debido a la complejidad del terreno. En la Tabla 5 se muestran las coordenadas geográficas de estos sitios de muestreo.



Figura 7. Sitios de muestreo de líquenes saxícolas ubicados en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México, CdMx. Imagen modificada de Google Earth, 2018.

Tabla 5. Sitios y sus respectivas coordenadas geográficas

No.	Sitio	Coordenadas
1	Zona Núcleo Poniente	19°18'55.14" N 99°11'28.55" O
2	Zona Núcleo Oriente	19°19'13.10" N 99°10'55.14" O
3	Senda Ecológica	19°18'46.24" N 99°10'53.56" O
4	Geopedregal	19°19'40.91" N 99°10' 31.82" O
5	Molotito Fac. Ciencias	19°19'26.63" N 99°10'31.82" O
6	Pedregal Remanente No. 42	19°19'36.50" N 99°11'21.25" O

2. Adecuación del método de muestreo

Se realizó una adaptación al método de muestreo de líquenes arbóricolas en los meses de agosto a octubre del 2017 adaptando el método propuesto en el Manual de Procedimientos para el muestreo de campo de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2011) y del Manual Red CE de nivel II de España (Servicio de Sanidad Forestal y Equilibrios Biológicos, 2005) (Figura 8). Las morfoespecies fueron determinadas de acuerdo a lo establecido por Le Blanc y De Sloover (1970) para determinar el Índice de Pureza Ambiental.

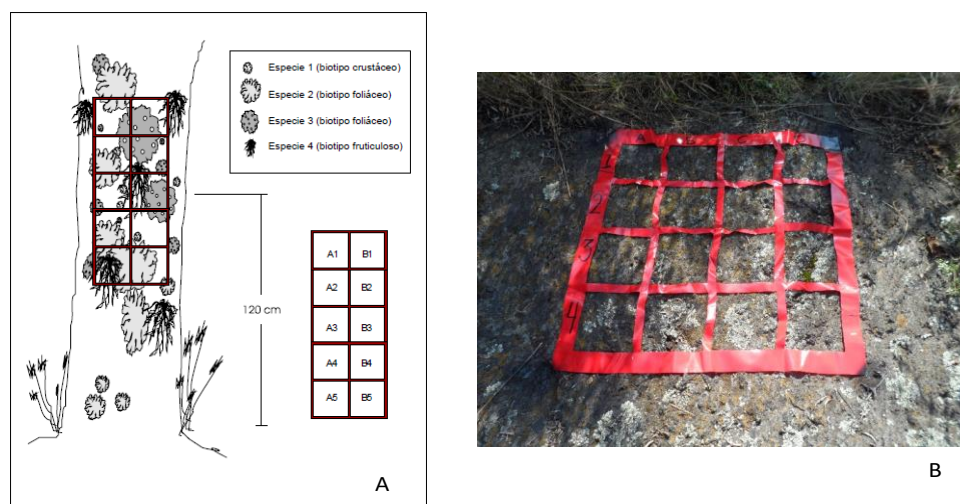


Figura 8. (A) Colocación de gradilla de muestreo de líquenes sobre la corteza de los árboles (B) Adaptación y colocación de gradilla a muestreo de líquenes saxícolas. Foto: Alva, 2016.

3. *Determinación de la cobertura de la especie de liquen*

Para la determinación de la cobertura líquénica en la temporada de lluvias (junio a octubre) del 2017, se llevó a cabo la medición de dicha cobertura mediante el uso de acetatos cuadriculados de 10 x 10 cm con subdivisiones de 1 x 1 cm. Estos acetatos se colocaron en los tres cuadrantes mas abundantes; se dibujó el contorno o cobertura del liquen, para posteriormente calcular el área que ocupaban las diferentes especies por microambiente (figura 9). Se calcularon la frecuencia, abundancia relativa y la absoluta. La frecuencia se obtuvo contando el número de especies registradas en cada cuadrante de la rejilla, teniendo 16 observaciones en cada repetición. La abundancia relativa se calculó sacando el porcentaje de individuos de cada especie en relación al total por rejilla. La abundancia absoluta se calculó de acuerdo al número de individuos en el área estudiada.



Figura 9. Determinación de la cobertura del liquen más abundante dentro de la rejilla de muestreo y medición de la cobertura del mismo (Fotos: Alva y Solórzano, 2017).

4. *Recolecta y procesamiento de líquenes*

La recolecta de líquenes saxícolas de las distintas morfoespecies se llevó a cabo en los meses de agosto a octubre del 2017 adaptando el método propuesto en el Manual de Procedimientos para el muestreo de campo de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2011). Con base a este manual se adaptó una rejilla de 50 x 50 cm con cuadros internos de 10 x 10 cm (figura 8), de acuerdo a la superficie de

cobertura de los líquenes saxícolas de la REPSA. Se contabilizaron y muestrearon las diferentes especies de líquenes que se presentaban por sitio o microambiente dentro de dicha rejilla, así como su tipo de talo y color.

Posteriormente, se muestreó el cuadrante que presentara la mayor cobertura del líquen *Xanthoparmelia conspersa* que se identificó como la especie más abundante; se humectó con ayuda de un atomizador asperjando aproximadamente 250 mL de agua corriente para que fuera más fácil su extracción y con unas pinzas de disección y navaja se retiró la muestra que fue guardada en sobres de papel para su traslado. También se sacaron muestras de otras especies con sustrato, es decir, con roca para su identificación y almacenamiento. Las muestras de *X. conspersa* fueron pesadas en húmedo y en seco (figura 10). Este método se realizó de acuerdo a Jaramillo y Botero (2010).



Figura 10. Recolección y procesamiento del líquen saxícola más abundante de cada sitio de muestreo en diferentes pedregales de Ciudad Universitaria de la UNAM, CdMx. (Foto Godínez, 2017).

5. Determinación del IPA

Se adaptó el método de cuantificación de Lijteroff y cols. (2009):

$$IPA \text{ microambiente} = \text{Sumatoria de la frecuencia de cada especie}^*$$

*número de tablas de la gradilla ocupados. Valores de 0 a 48.

$$IPA \text{ área} = \text{Promedio de los valores de los IPA por microambiente de cada sitio de estudio}$$

6. Molido y preparación de muestras

Se pesó cada muestra húmeda recolectada y con el suelo que tenía adherido del sustrato; después se llevó a un lavado para retirarle dicho suelo con agua corriente en tubos de PVC de 8 cm de largo por 5 cm de ancho con una malla de tela blanca, donde se colocaron las muestras y se dejaron de 24 a 48 h para eliminar el sustrato adherido. Después se pusieron a secar estas muestras en un horno a temperatura constante a 45 °C durante 48 h y fueron pesadas nuevamente (Jaramillo y Botero, 2010). Posteriormente, cada muestra fue molida en un mortero de ágata para llevarla a análisis de elementos potencialmente tóxicos (figura 11).

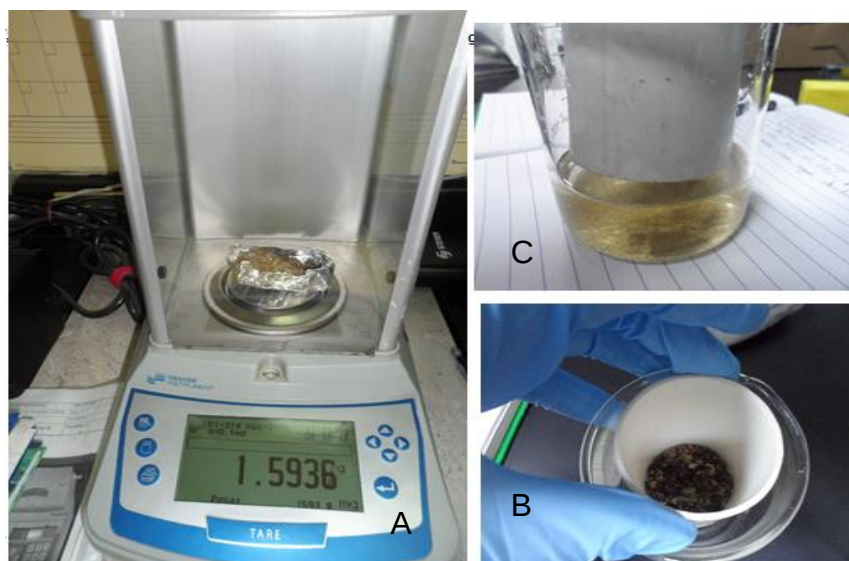


Figura 11. Pesado de las muestras de los líquenes saxícolas recolectados (A), humectación (B) y limpieza en tamiz del suelo adherido en sus tejidos (C). Foto: Alva, 2017.

Registro fotográfico

Posteriormente se realizó el registro fotográfico de los líquenes muestreados que consistió en seleccionar los que presentaran estructuras reproductivas definidas y visibles para su determinación taxonómica. Se documentó la superficie, las estructuras reproductivas, elaborando cortes transversales fijados en alcohol polivinílico-lactoglicerol para observar la estructura interna con un microscopio estereoscópico LEICA modelo MZ 12.5 a un aumento de 10 x (Figuras 12 y 13).

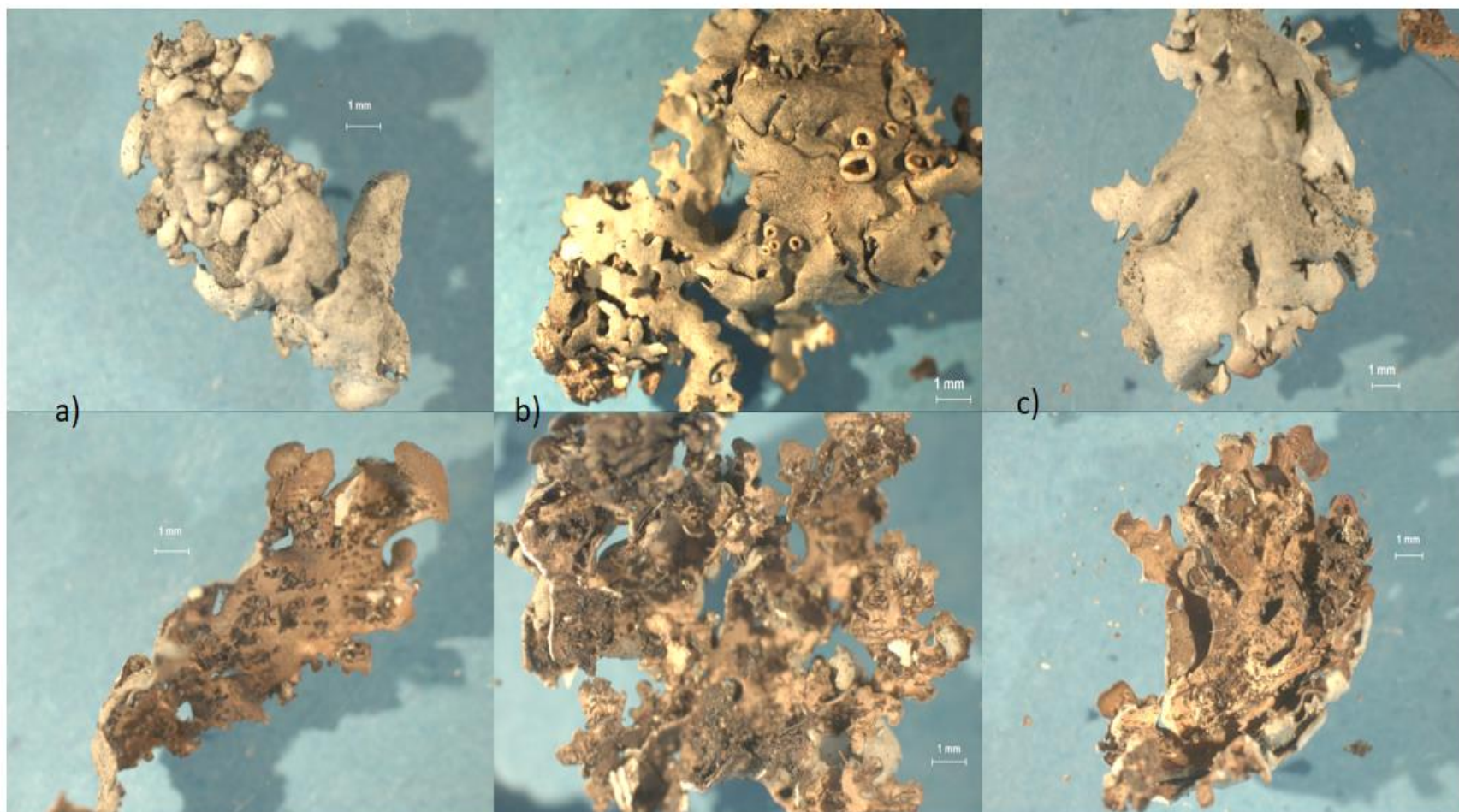


Figura 12. Aspecto superficial (imágenes superiores) y basal que hace contacto con la roca (imágenes inferiores) de *Xanthoparmelia conspersa*, líquen más abundante de los sitios muestreados en la Ciudad Universitaria. Fotos: Alva, 2017.



Figura 13. Aspecto del montado de los cortes transversales (a, b, c) de *Xanthoparmelia conspersa*, el líquen más abundante de algunos pedregales de la Ciudad Universitaria. Acercamiento de los mismos para observar a detalle las estructuras internas (d, e, f). Fotos: Alva, 2017.

7. Cuantificación de elementos potencialmente tóxicos

La digestión de las muestras se llevó a cabo con base al método EPA-3052 (USEPA, 1996). Se pesaron 0.4 g de muestra homogeneizada en una balanza analítica y se colocaron en un liner de teflón con capacidad de 25 mL con dos duplicados al azar cada 10 muestras. Se corrió una muestra patrón marca NIST, número de serie 1570a– Trace elements in spinach. Se adicionaron 5 mL de ácido nítrico (HNO_3) bidestilado de pureza 69 -70% y 5 mL de peróxido de hidrogeno (H_2O_2), se montaron en un carrusel con capacidad para 16 muestras para digerir en el sistema de reacción de microondas “Microwave 3000”, marca AntonPaar. Se utilizó un programa para digerir materia vegetal, con una rampa de temperatura de cuatro etapas: 1) calentamiento a 170 °C, 2 min; 2) 180°C, por 3.5 min; 3) mantenimiento a 180°C por 9.5 min; 4) enfriamiento 20 min. La presión que mantuvo fue de 0.5 bar/s, la intensidad del infrarrojo fue de 140°C y se ajustó a una potencia de 1200 W. Las muestras digeridas se dejaron enfriar por 30 min aproximadamente a temperatura ambiente, posteriormente se purgaron los tubos en la campana de extracción para expulsar los vapores nítricos. Cada muestra se aforó en matraces de 25 mL con agua Mili Q para homogeneizarlas evitando la prevalencia de distintas fases de los líquidos. Las muestras digeridas se guardaron en tubos Falcon® de polipropileno. La lectura multielemental se llevó a cabo en el laboratorio de Espectrometría Atómica del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, su lectura se realizó con un espectrómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente, ICP-OES marca Optima modelo 8300 con nebulizador ultrasónico, en el cual se leyeron 24 muestras con una solución estándar (ISTD).

Índice de Diversidad de Shannon-Wiener

Se calculó el índice de Diversidad de Shannon-Wiener para las especies de líquenes saxícolas que habitan en los pedregales estudiados. Este índice expresa la uniformidad de los valores de importancia a través de todas las especies de la muestra. Esto permite predecir de qué especie aparecerá un individuo escogido al azar en un muestreo, asumiendo que todas las especies están representadas en

la muestra. Adquiere valores entre cero cuando hay una sola especie y el logaritmo de S, cuando todas las especies están representadas por el mismo número de individuos (Lijteroff et al., 2009).

$$H' = - \sum P_i (\ln P_i)^*$$

** $P_i = n_i/nT$ **;* n_i : número de tablas de la gradilla ocupados por taxón

*** nT :* número total de tablas de la gradilla (48)

Análisis estadísticos

Se realizó una ANOVA de dos vías sobre las variables de respuesta como la cobertura, riqueza y elementos analizados de acuerdo a los sitios estudiados por sitio de exposición y por microambiente contrastante. Se corrieron correlaciones de Pearson con los valores de IPA y abundancia.

X. Resultados

Caracterización de líquenes saxícolas en diferentes microambientes

Se realizó una caracterización morfológica de las especies de líquenes que se han descrito en la Ciudad Universitaria (Anexo 1) y su presencia por sitio de estudio, describiendo el tipo de talo, su abundancia por cobertura y frecuencia de los líquenes saxícolas en los microambientes que forma la lava (Tabla 7). Estas morfoespecies liquenáceas se muestran en la figura 14 A-F. La mayoría de los líquenes encontrados presentó un crecimiento de talo folioso siendo las más abundantes las pertenecientes a la familia Lecanorales caracterizados por ser de color verde amarillento, con apotecios lecanorinos, discos pardos que son visibles a simple vista, son cosmopolitas y de ambientes húmedos a secos; siendo *Xanthoparmelia* el género más abundante (Barreno-Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003b). Se determinó una riqueza de 10 especies de líquenes saxícolas, la especie que mayor frecuencia presentó fue la afín a *Xanthoparmelia conspersa* que se encontró en todos los sitios y microambientes estudiados. Las que menor frecuencia tuvieron se presentaron exclusivamente en uno de los sitios como *X. mexicana* y *X. tinctina*.

Índice de Diversidad de Shannon-Wiener

Se realizó el calculo sobre la diversidad de líquenes saxícolas encontrados en la Ciudad Universitaria por sitio de estudio, donde se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 6; el sitio con mayor diversidad de líquenes saxícolas fue “el Molotito” de la Facultad de Ciencias con 0.83 y el menos diverso fue la Zona Núcleo Poniente con 0.12.

Tabla 6. Índice de Diversidad de Shannon-Wiener de líquenes saxícolas encontrados en los sitios de estudio de la Ciudad Universitaria, UNAM, CdMx.

Índice de Diversidad de Shanno-Wiener					
Sendero Ecológico	Zona Núcleo Oriente	Zona Núcleo Poniente	Pedregal Remanente No. 42	Geopedregal	Molotito Facultad de Ciencias
0.37	0.16	0.12	0.30	0.11	0.83

Tabla 7. Frecuencia (F), abundancia absoluta (AA) y abundancia relativa (AR) de las especies de líquenes encontradas en algunos pedregales expuestos a emisiones vehiculares en el campus de la CU, UNAM, CdMx.

Sitio	Tipo de talo	Especie afín	F	AR	AA
Senda Ecológica	Folioso	<i>Xanthoparmelia coloradoensis</i> (Gyeln.) Hale	7	14.3	7.0
		<i>Xanthoparmelia conspersa</i> (Ach.) Hale	22	44.9	2.2
		<i>Xanthoparmelia lineola</i> (E. C. Berry) Hale	9	18.4	5.4
	Costroso	<i>Caloplaca citrina</i> (Hoffm.) Th. Fr.	6	12.2	8.2
		<i>Lecidea</i> sp.	5	10.2	8.2
		Total	49		
Zona Núcleo Oriente	Folioso	<i>X. coloradoensis</i>	9	12.9	7.7
		<i>X. conspersa</i>	25	35.7	2.8
		<i>Xanthoparmelia incerta</i> (Kurok. & Filson) Elix & J. Johnst	18	25.7	3.8
	Costroso	<i>C. citrina</i>	13	18.6	5.3
		<i>Candelina submexicana</i> (B. de Lesd.) Poelt	5	7.1	14.1
		Total	70		
Zona Núcleo Poniente	Folioso	<i>X. conspersa</i>	35	31.2	3.2
		<i>X. lineola</i>	15	13.2	7.6
		<i>Xanthoparmelia mexicana</i> (Gyeln.) Hale	11	9.7	10.3
		<i>Xanthoparmelia plittii</i> (Gyeln.) Hale	22	19.4	5.1
		<i>Xanthoparmelia tinctoria</i> (Maheu & Gillet) Hale	13	11.5	8.7
	Costroso	<i>C. citrine</i>	7	6.2	16.1
		<i>C. submexicana</i>	7	6.2	16.1
		<i>Lecidea</i> sp.	3	2.6	38.5
		Total	113		
Pedregal Remanente no. 42	Folioso	<i>X. conspersa</i>	10	58.8	1.7
		<i>X. plittii</i>	7	41.2	2.4
		Total	17		
Geopedregal- IGI	Folioso	<i>X. coloradoensis</i>	12	18.2	5.4
		<i>X. conspersa</i>	29	43.9	2.3
		<i>X. plittii</i>	15	22.7	4.4
	Costroso	<i>C. citrine</i>	5	7.6	13.2
		<i>Lecidea</i> sp.	5	7.6	13.2
		Total	66		
Molotito-FC	Folioso	<i>X. conspersa</i>	42	42.8	8.2
		<i>X. incerta</i>	15	15.2	6.5
		<i>X. lineola</i>	16	16.1	6.1
		<i>X. plittii</i>	11	11.2	9.0
	Costroso	<i>C. citrine</i>	8	8.2	12.2
		<i>Lecidea</i> sp.	6	6.1	16.4
		Total	98		

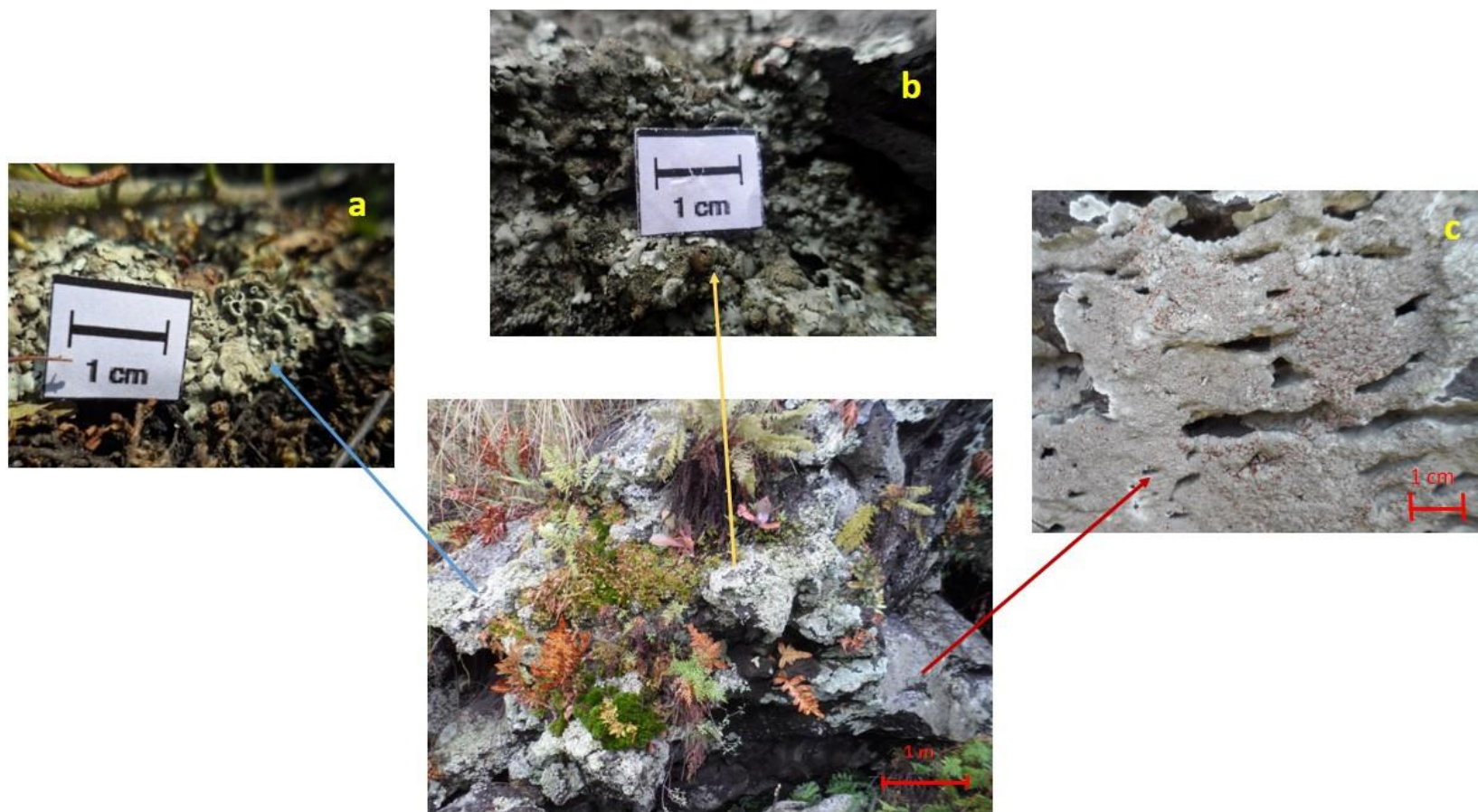


Figura 14. A-1). Aspecto de líquenes saxícolas encontrados en el microambiente pared ubicado en la Zona Núcleo Oriente de la REPSA, UNAM, CdMx a, b) líquenes foliosos, c) líquenes costrosos. Fotos: Alva, 2017.

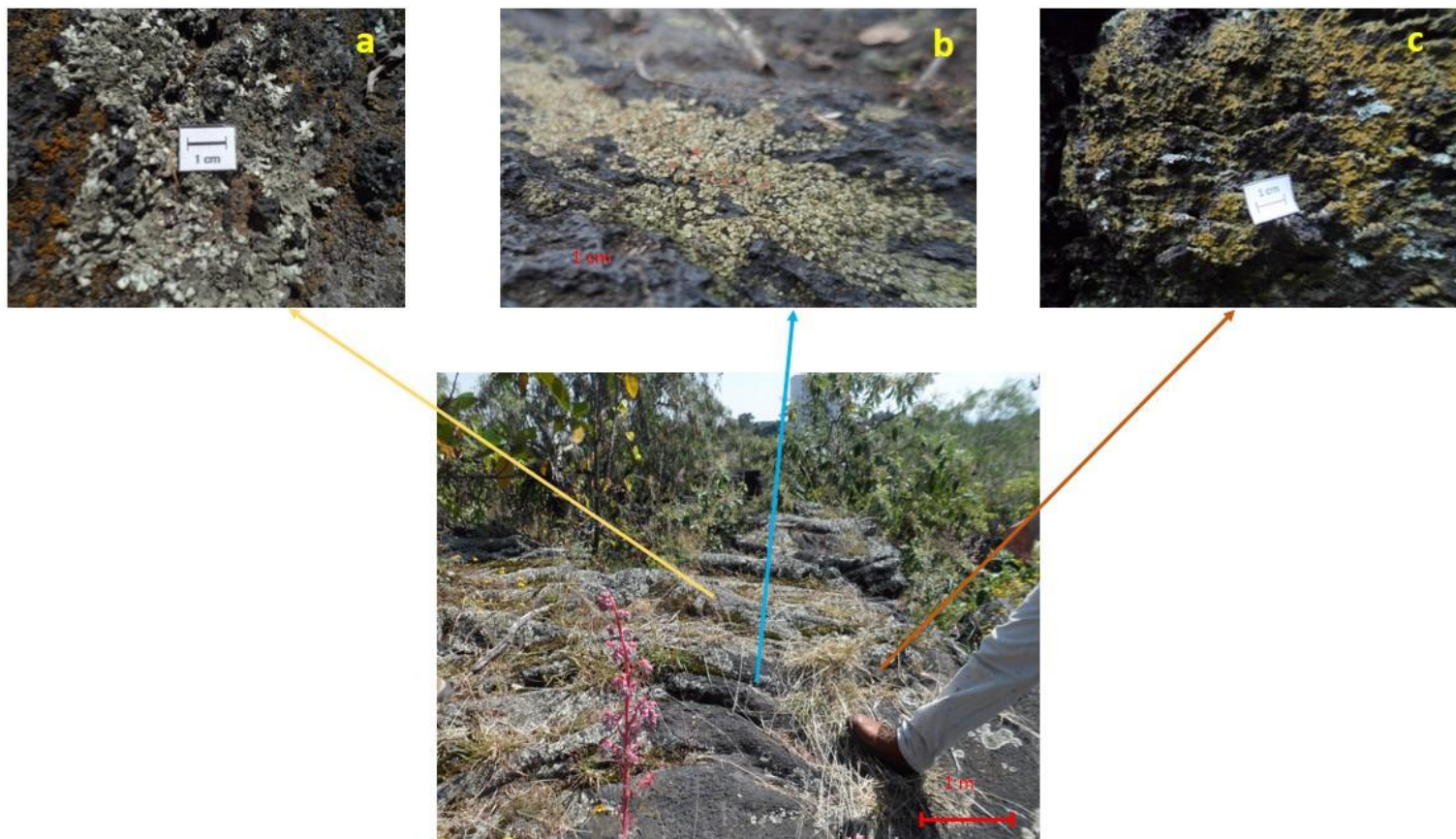


Figura 14.A- 2. Aspecto de líquenes saxícolas encontrados en el microambiente sitio plano ubicado en la Zona Núcleo Oriente de la REPSA, UNAM, CdMx. a) líquenes foliosos, b, c) líquenes costrosos. Fotos: Alva, 2017.

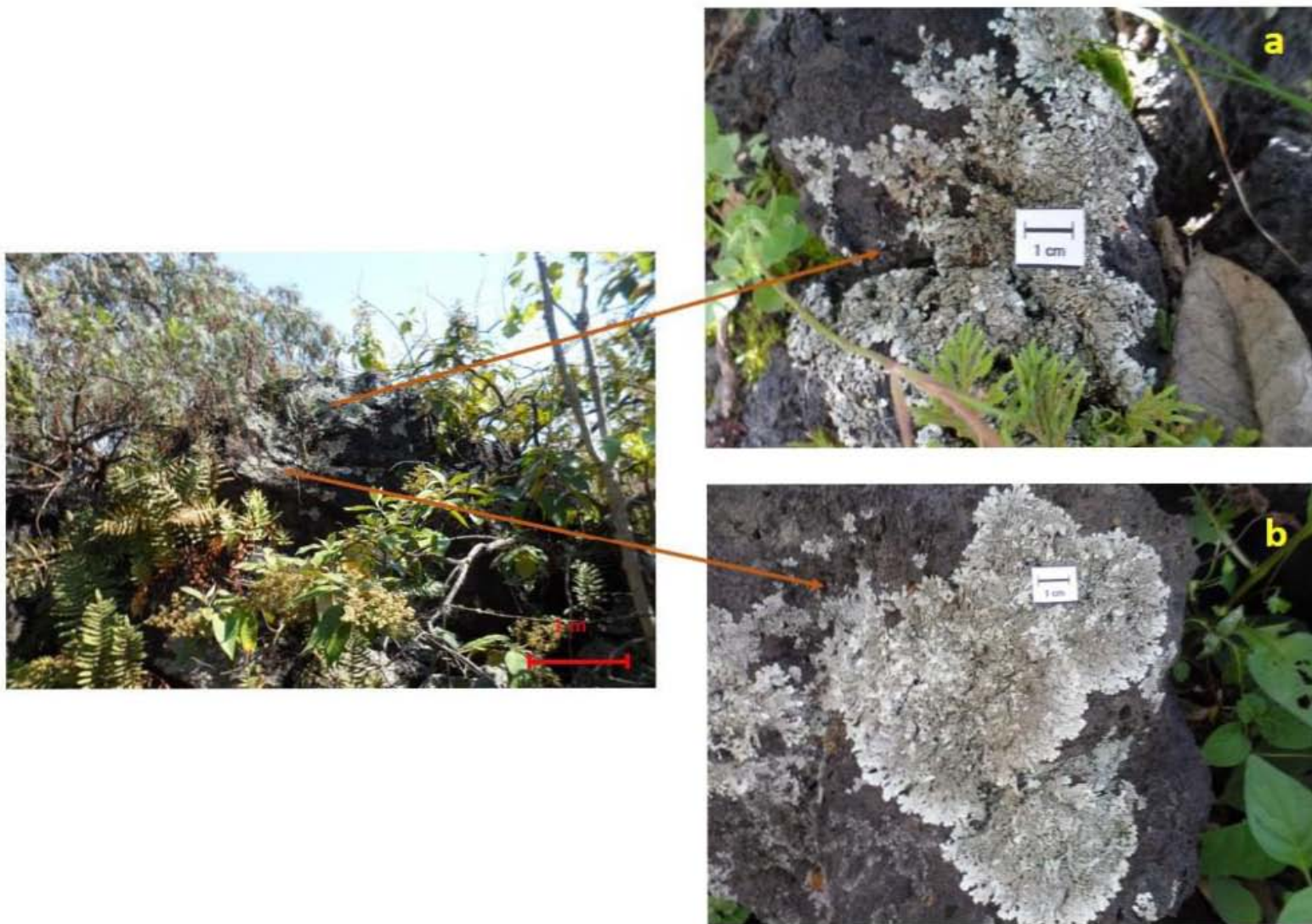


Figura 14.B-1). Aspecto de líquenes saxícolas encontrados en el microambiente pared ubicado en la Zona Núcleo Poniente de la REPSA, UNAM. a, b) líquenes foliosos. Fotos: Alva, 2017.

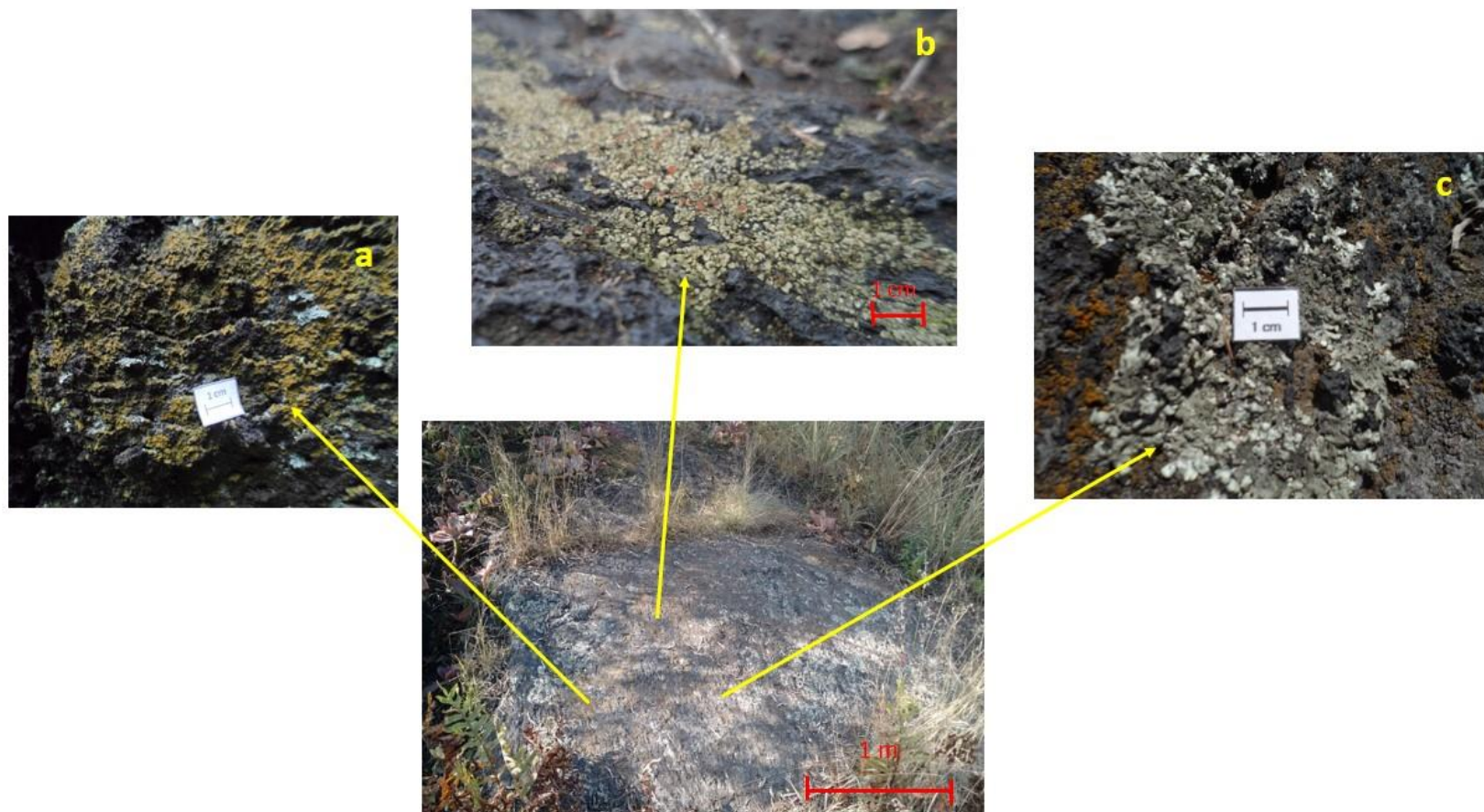


Figura 14. B-2) Aspecto de líquenes saxícolas encontrados en el microambiente sitio plano ubicado en la Zona Núcleo Poniente de la REPSA, UNAM. a, b) líquenes costrosos; c) líquenes foliosos. Fotos: Alva, 2017.

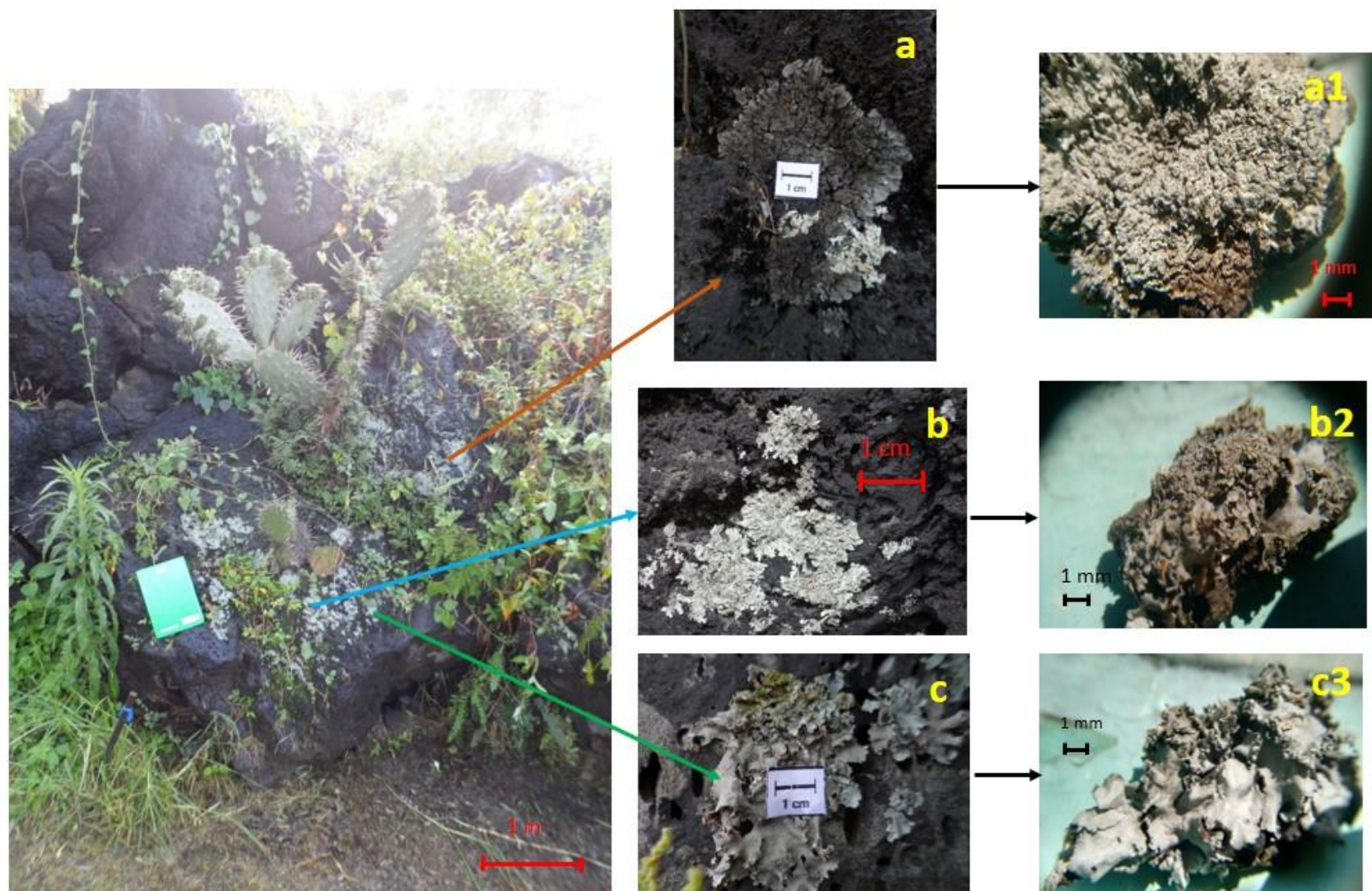


Figura 14. C-1). Aspecto de líquenes saxícolas encontrados en el microambiente pared ubicado en el pedregal remanente Geopedregal de la Ciudad Universitaria, UNAM. a, b, c) líquenes foliosos. a1, b2, c3) líquenes vistos en lupa 10 x. Fotos: Alva, 2017.



Figura 14. C-2). Aspecto de líquenes saxícolas encontrados en el microambiente plano ubicado en el pedregal remanente Geopedregal de la Ciudad Universitaria, UNAM. a, b) líquenes foliosos. Fotos: Alva, 2017

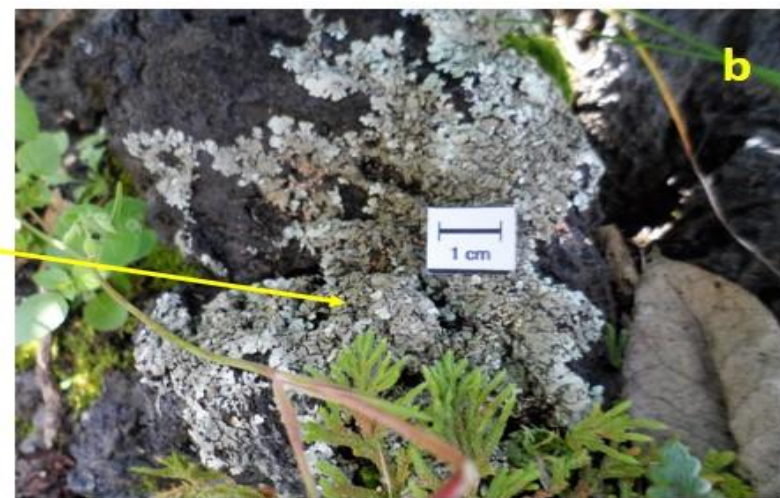


Figura 14. D-1). Aspecto de líquenes saxícolas encontrados en el microambiente promontorio ubicado en el pedregal remanente Molotito de la Facultad de Ciencias de la UNAM. a, b) líquenes foliosos. Fotos: Alva, 2017.

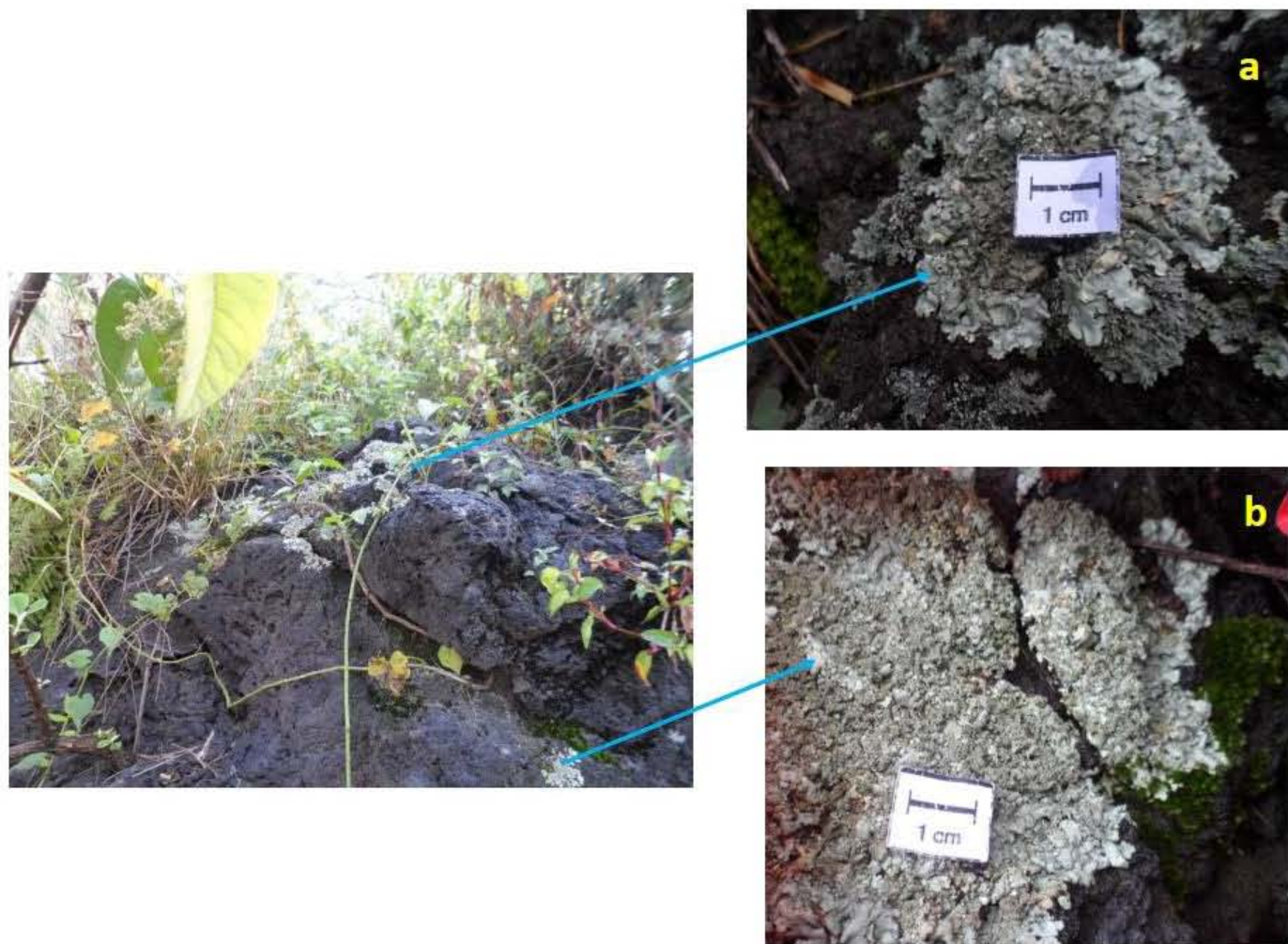


Figura 14. D-2). Aspecto de líquenes saxícolas encontrados en el microambiente pared ubicado en el pedregal remanente Molotito de la Facultad de Ciencias de la UNAM. a, b) líquenes foliosos. Fotos: Alva, 2017.

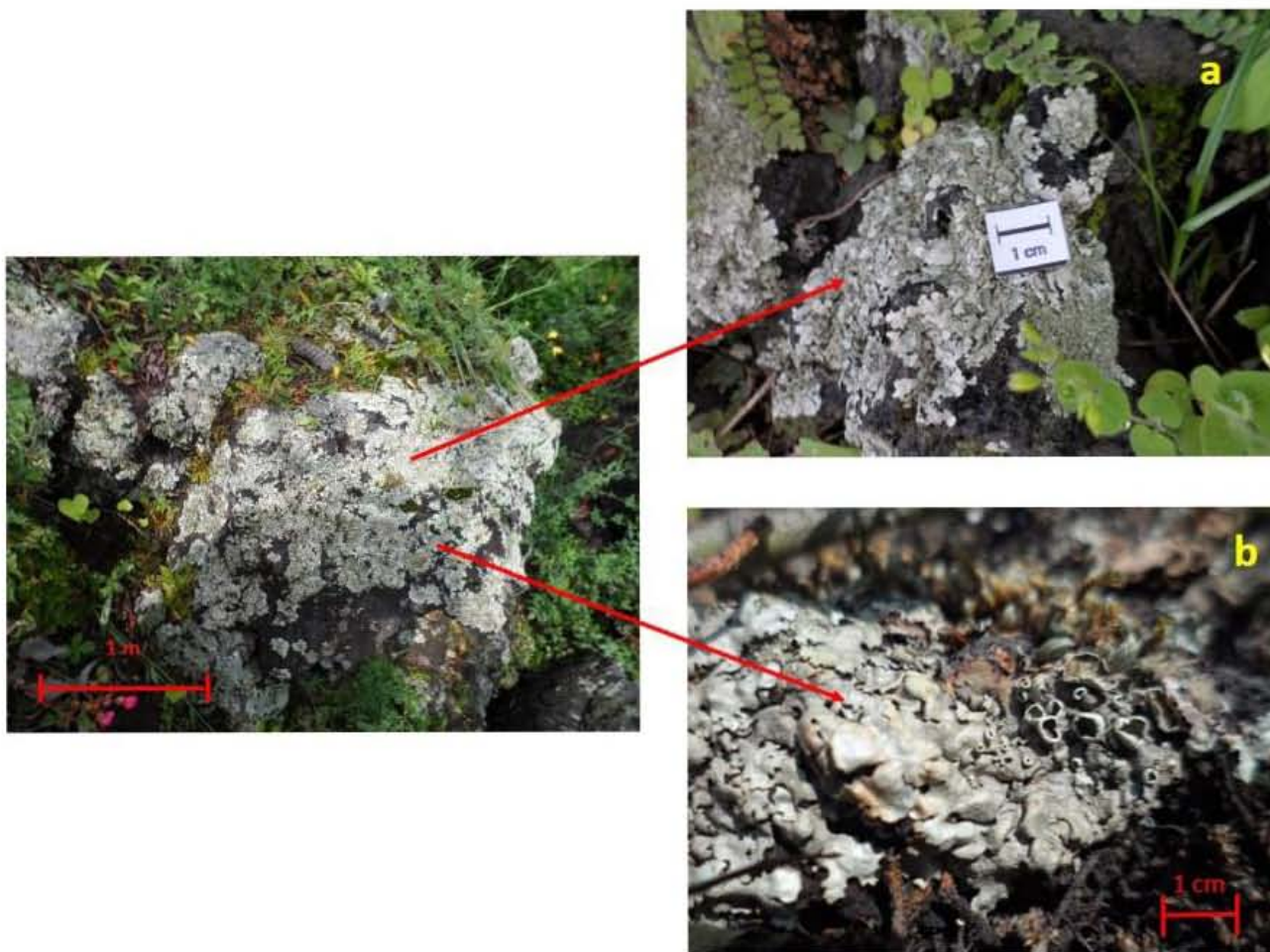


Figura 14. E-1). Aspecto de líquenes saxícolas encontrados en el microambiente pared ubicado en la Senda Ecológica del Museo Univerum de la UNAM. a, b) líquenes foliosos. Fotos: Alva, 2017.

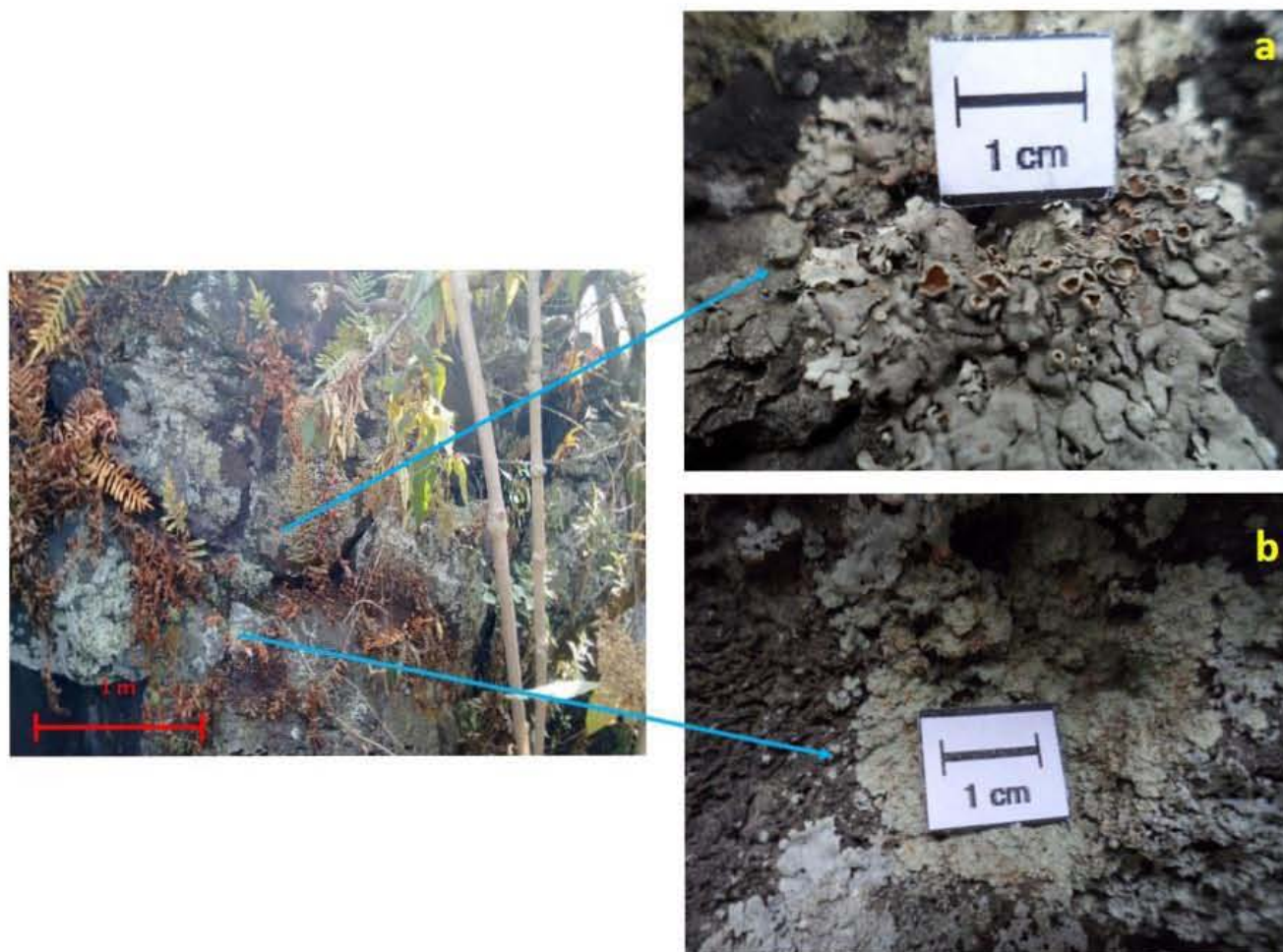


Figura 14. F-1). Aspecto de líquenes saxícolas encontrados en el microambiente promontorio ubicado en el pedregal Remanente 42 de la Ciudad Universitaria de la UNAM. a, b) líquenes foliosos. Fotos: Alva, 2017.



Figura 14. F-2). Aspecto de líquenes saxícolas encontrados en el microambiente pared ubicado en el pedregal Remanente 42 de la Ciudad Universitaria de la UNAM. a, b) líquenes foliosos. Fotos: Alva, 2017.

Cobertura de líquenes saxícolas

En el Tabla 8 se presentan los resultados de la cobertura de la especie más abundante, *X. conspersa*, en los diferentes microambientes analizados. Se observa que en la cobertura total en porcentaje, los valores varían entre 17.0 a 25.3 y que los sitios de la Zona Núcleo Poniente y Oriente son, en general más abundantes, aunque no se muestran diferencias significativas entre ellos ($p < 0.05$). Los microambientes con una cobertura mayor fueron los promontorios, seguidos por los planos y por último las paredes. En la cobertura promedio, se observó que en general, son más altas en las paredes y promontorios que en los sitios planos de las zonas menos expuestas al paso vehicular. Sin embargo, en cobertura promedio, no se observa ninguna diferencia significativa entre sitios o microambientes, fluctuando alrededor de los 60 cm.

Tabla 8. Cobertura de la especie de liquen más abundante afín a Xanthoparmelia conspersa y el porcentaje que ocuparon en los diferentes sitios y microambientes, en diferentes pedregales dentro del campus de la Ciudad Universitaria de la UNAM, CdMx.

	Promontorio			Pared			Plano		
	Cobertura promedio	Cobertura total (cm)	Porcentaje cobertura (%)	Cobertura promedio	Cobertura total (cm)	Porcentaje cobertura (%)	Cobertura promedio	Cobertura total (cm)	Porcentaje cobertura (%)
Senda Ecológica	76	228	25.3	67	201	22.3			
Zona Núcleo Oriente				55	193	21.4	64	166	18.4
Zona Núcleo Poniente				57	171	19	61	182	20.2
Pedregal Remanente No. 42	56	153	17	76	168	18.7			
Geopedregal				56	168	18.7	61	183	20.3
Molotito Facultad de Ciencias	74	221	24.6	53	159	17.7			

Índice de Pureza Atmosférica (IPA)

Los valores del IPA de cada microambiente por pedregal (Tabla 9) podrían corresponder a un máximo de 48 (suponiendo que en una condición ideal se encontraran las 10 especies en el total de tablas analizadas que fueron 16 con tres repeticiones que se hicieron en cada sitio). De acuerdo a la escala de Lijteroff y cols. (2009), cero representa una calidad del aire mala por la nula presencia de líquenes y mayor a treinta una calidad adecuada suponiendo que cada especie estuviera representada al menos una vez en cada submuestra. Los cálculos de dichos índices se presentan en el Anexo 2. En el Tabla 10 se muestran los valores obtenidos del IPA por sitio. Por tanto, los sitios en donde se presume que la calidad del aire fue mejor en orden creciente fueron: Pedregal Remanente No. 42 < Sendero ecológico < Geopedregal < Zona núcleo Oriente < Molotito Facultad de Ciencias < Zona núcleo Poniente. Dentro de cada sitio, los microambientes tuvieron valores similares de IPA excepto en el Geopedregal en donde las paredes tienen mayor frecuencia que los sitios planos. En promedio, los sitios planos tuvieron el 33.3 de IPA, seguido por las paredes con 30.2 y finalmente los promontorios con 24.7.

Tabla 9. Índice de Pureza Atmosférica obtenido por microambiente dentro de los distintos pedregales estudiados en la Ciudad Universitaria, CdMx.

	Promontorio	Pared	Plano
Senda Ecológica	21	28	
Zona Núcleo Oriente		37	33
Zona Núcleo Poniente		43	41
Pedregal Remanente No. 42	10	7	
Geopedregal		40	26
Molotito Facultad de Ciencias	43	44	

Tabla 10. Índice de Pureza Atmosférica promedio obtenido por pedregal expuesto a diferentes condiciones de emisiones vehiculares dentro de la Ciudad Universitaria, CdMx.

Sitio	IPA área
Sendero Ecológico (SE)	24.5
Zona Núcleo Oriente (ZNO)	35.0
Zona Núcleo Poniente (ZNP)	42.0
Pedregal Remanente no. 42 (PR)	8.5
Geopedregal (GP)	33.0
Molotito-FC (MFC)	41.5

Elementos cuantificados en los tejidos de *Xanthoparmelia conspersa*

En el Anexo 3 se presentan los límites de detección y las concentraciones de los elementos que fueron evaluados en el ICP- OES en los tejidos del liquen más abundante en todos los pedregales muestreados, *Xanthoparmelia conspersa*. En la figura 15, se seleccionaron los 18 elementos cuantificados, algunos de ellos son metales pesados que están relacionados directamente con emisiones por

contaminación atmosférica (a-c) y otros que se relacionan con múltiples fuentes (c). En la ZNO, se encontraron mayores concentraciones de Cu y Zn; en la ZNP de As, Cd, V, Al y Sr; en la SE las concentraciones más bajas de los elementos; en el PR42 solamente el P; en el MFC el Pb y el Sr y en el Geopedregal destacan el Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Si y Ti; Li, Ba y Fe. Exceptuando con algún sitio con contenido excepcional de alguno de estos elementos, en general, para los pedregales expuestos al tránsito vehicular, las concentraciones encontradas en los tejidos fueron ligeramente mayores en Cd, Cr, Mn, Li, Sr, Ba, Fe, P. Por otro lado y respecto a las concentraciones de los elementos; para As, Ba, Cd, Mn y V están por debajo de los límites de toxicidad (Viana-Rodríguez, 2003) aunque en concentraciones superiores a las normales. Para Cr, las concentraciones en el Geopedregal y pedregal remanente 42 superan los niveles normales, el Ni se acerca a los niveles normales en el Geopedregal al igual que el Pb para las dos zonas núcleo y el Molotito. Nutrientes como Fe, Zn y P se encuentran muy elevados en los tejidos y para otros se desconocen los límites máximos permisibles como Sr, Co, Al.

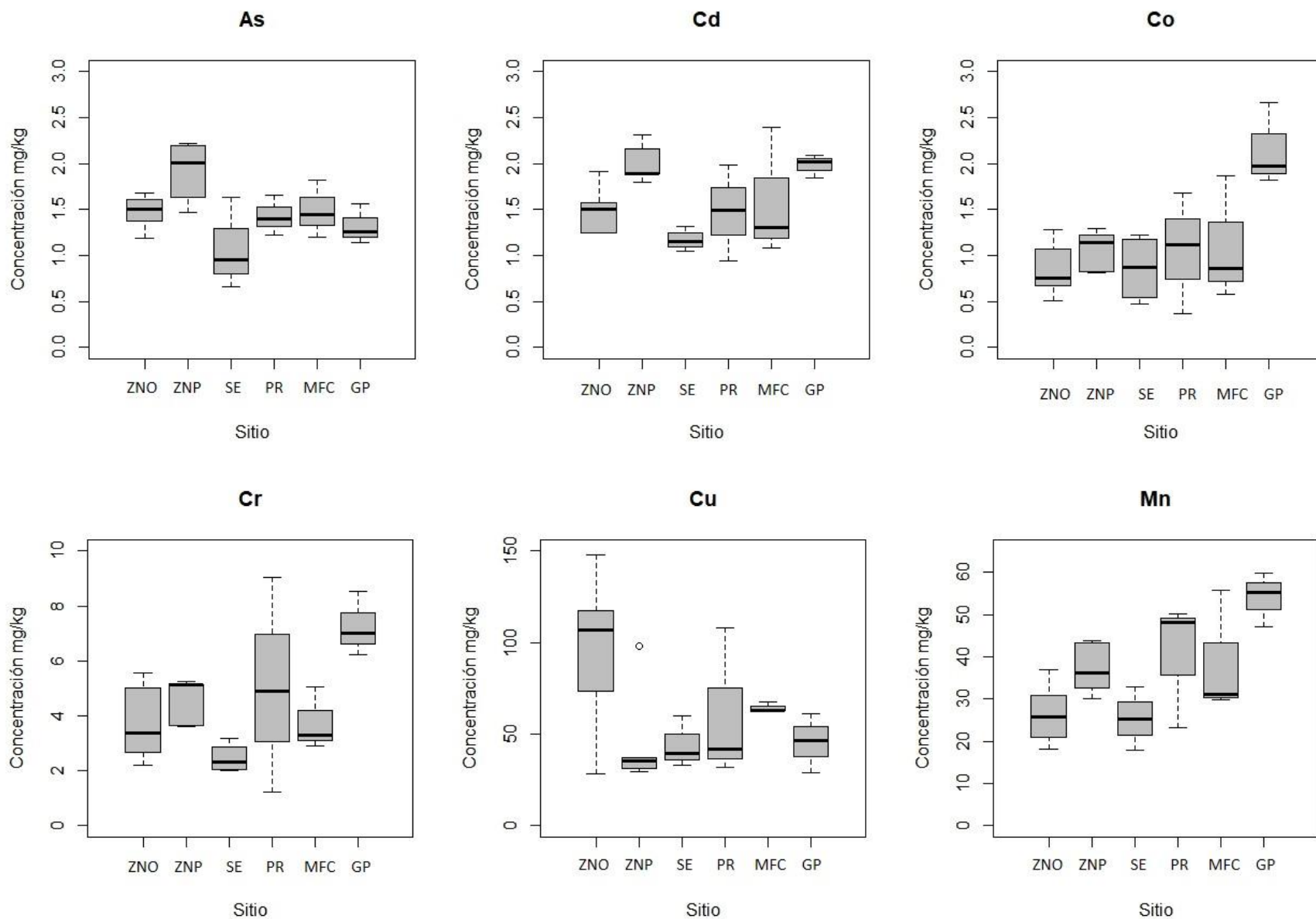


Figura 15a. Rangos de concentraciones de algunos metales pesados en los tejidos del líquen *Xanthoparmelia conspersa* (las líneas oscuras dentro de la caja representan la mediana, en la caja el percentil (25 inferior y 75 superior %), las líneas interrumpidas son los valores máximos y mínimos) en seis sitios ubicados a distintas distancias de emisiones vehiculares dentro de la Ciudad Universitaria de la UNAM (México, CDMX). En las gráficas superiores como los menos expuestos Zona Núcleo Oriente (ZNO), Zona Núcleo Poniente (ZNP); Sendero Ecológico (SE) y en la parte inferior los que se encontraron; Pedregal Remanente no. 42 (PR); Molotito-FC (MFC) y Geopedregal (GP).

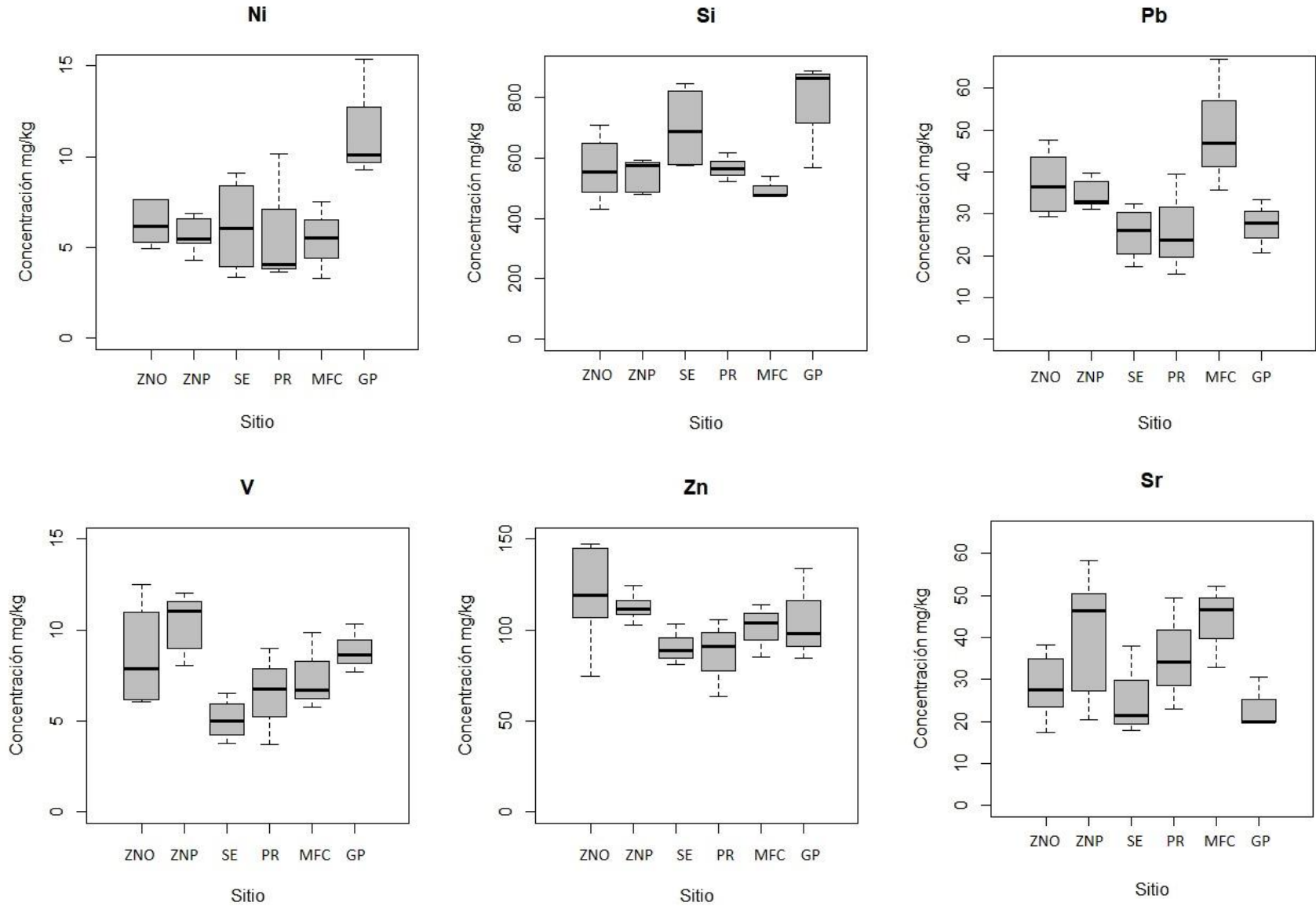


Figura 15b. Rangos de concentraciones de algunos metales pesados en los tejidos del líquen *Xanthoparmelia conspersa* (las líneas oscuras dentro de la caja representan la mediana, en la caja el percentil (25 inferior y 75 superior %), las líneas interrumpidas son los valores máximos y mínimos) en seis sitios ubicados a distintas distancias de emisiones vehiculares dentro de la Ciudad Universitaria de la UNAM (México, CDMX) presentados en las gráficas superiores como los menos expuestos Zona Núcleo Oriente (ZNO), Zona Núcleo Poniente (ZNP); Sendero Ecológico (SE) y en la parte inferior los que se encontraron; Pedregal Remanente no. 42 (PR); Molotito-FC (MFC) y Geopedregal (GP).

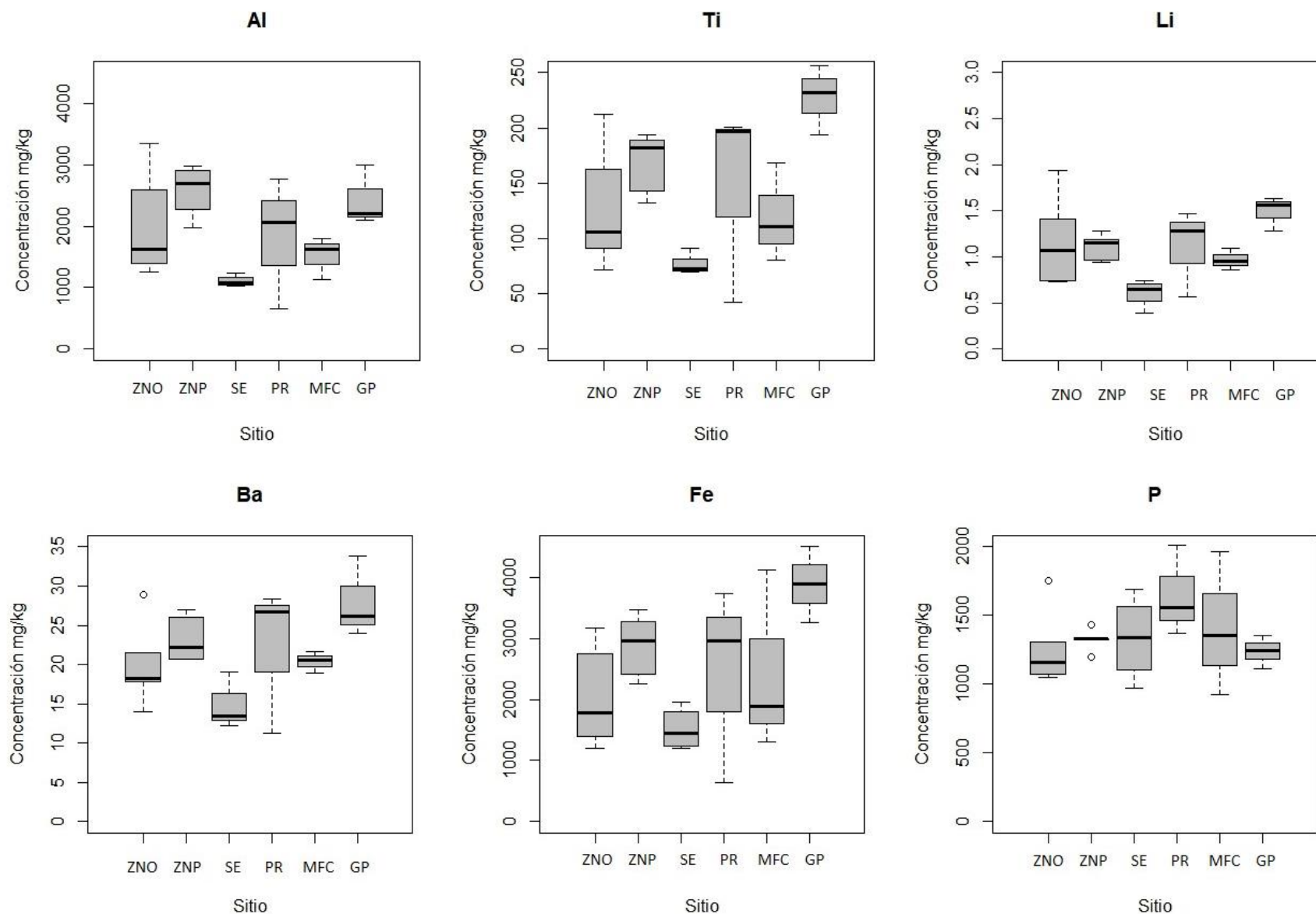


Figura 15c. Rangos de concentraciones de algunos metales pesados en los tejidos del líquen *Xanthoparmelia conspersa* (las líneas oscuras dentro de la caja representan la mediana, en la caja el percentil (25 inferior y 75 superior %), las líneas interrumpidas son los valores máximos y mínimos) en seis sitios ubicados a distintas distancias de emisiones vehiculares dentro de la Ciudad Universitaria de la UNAM (México, CDMX) presentados en las gráficas superiores como los menos expuestos Zona Núcleo Oriente (ZNO), Zona Núcleo Poniente (ZNP); Sendero Ecológico (SE) y en la parte inferior los que se encontraron; Pedregal Remanente no. 42 (PR); Molotito-FC (MFC) y Geopedregal (GP).

El ANOVA de dos vías (sitios y microambientes) para comparar la concentración de los elementos acumulados en *Xanthoparmelia conspersa* entre los sitios con distinta exposición y los microambientes, mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los grupos, siendo en general, el conjunto de los líquenes que están presentes en las zonas núcleo de la REPSA los que capturan menor cantidad de elementos contaminantes.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Microambientes	52097449.7	17	3064555.87	53.7644193	4.0639E-38	1.74429885
Sitios	557498.827	5	111499.765	1.95614647	0.0934897	2.32181225
Error	4844974.65	85	56999.7017			
Total	57499923.2	107				

La correlación de Pearson presentó una relación entre la abundancia, el IPA y la diversidad de líquenes (Tabla 11). Los elementos que pueden tener un mismo origen son el Cd con el Al y Ti, el Ba con el Cr y Sr, el Cr y el Sr entre sí y el Fe con ambos (Cr y Sr), el Ba y Li, el Ti y Al. La cobertura de *X. conspersa* parece afectarse por el contenido de Mn y en un 70% por el Ba y Cr, aunque en general, la cobertura líquénica promedio no se vió afectada por ningún elemento como se observa en las gráficas entre los sitios. La diversidad por microambiente y sitio, raramente se vio relacionada con la concentración de Ni.

Tabla 11. Matriz de correlación de Pearson para los elementos cuantificados determinados en la especie *Xanthoparmelia conspersa* respecto a la cobertura del mismo (CXC), cobertura promedio (CP), IPA e Índice de Diversidad de Shannon en distintos sitios de la Ciudad Universitaria de la UNAM (CdMx). En negritas se muestran las correlaciones significativas ($p > 0.05$).

	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mn	Ni	P	Pb	Si	Sr	Ti	V	Zn	CXC	CP	IPA	Shannon
Al	1.00	0.70	0.86	0.97	0.61	0.78	-0.18	0.84	0.82	0.60	0.53	0.03	0.10	0.03	0.88	0.95	0.67	-0.33	-0.32	0.30	0.18	0.53
As	0.70	1.00	0.48	0.67	-0.04	0.22	0.10	0.32	0.41	0.18	-0.18	0.45	-0.62	0.65	0.37	0.81	0.60	0.05	-0.12	0.06	-0.23	-0.13
Ba	0.86	0.48	1.00	0.91	0.84	0.96	-0.20	0.95	0.96	0.91	0.69	0.03	0.23	0.04	0.97	0.74	0.37	-0.16	-0.71	0.11	0.10	0.74
Cd	0.97	0.67	0.91	1.00	0.69	0.83	-0.28	0.91	0.82	0.72	0.53	0.10	0.12	0.11	0.92	0.92	0.58	-0.31	-0.49	0.18	0.27	0.52
Co	0.61	-0.04	0.84	0.69	1.00	0.96	-0.37	0.93	0.80	0.89	0.90	-0.22	0.67	-0.36	0.91	0.42	0.14	-0.35	-0.71	0.13	0.43	0.88
Cr	0.78	0.22	0.96	0.83	0.96	1.00	-0.28	0.97	0.93	0.92	0.85	-0.15	0.49	-0.22	0.98	0.61	0.28	-0.26	-0.70	0.16	0.25	0.87
Cu	-0.18	0.10	-0.20	-0.28	-0.37	-0.28	1.00	-0.36	0.04	-0.41	-0.08	0.53	-0.50	0.12	-0.31	0.04	0.43	-0.17	0.08	0.64	-0.40	-0.06
Fe	0.84	0.32	0.95	0.91	0.93	0.97	-0.36	1.00	0.88	0.89	0.78	-0.05	0.43	-0.12	0.99	0.71	0.37	-0.35	-0.68	0.14	0.38	0.76
Li	0.82	0.41	0.96	0.82	0.80	0.93	0.04	0.88	1.00	0.81	0.77	0.02	0.24	-0.09	0.93	0.72	0.45	-0.22	-0.65	0.32	-0.00	0.84
Mn	0.60	0.18	0.91	0.72	0.89	0.92	-0.41	0.89	0.81	1.00	0.65	-0.11	0.38	0.01	0.88	0.42	-0.02	0.04	-0.84	-0.20	0.13	0.72
Ni	0.53	-0.18	0.69	0.53	0.90	0.85	-0.08	0.78	0.77	0.65	1.00	-0.29	0.74	-0.64	0.79	0.37	0.29	-0.53	-0.46	0.48	0.38	0.96
P	0.03	0.45	0.03	0.10	-0.22	-0.15	0.53	-0.05	0.02	-0.11	-0.29	1.00	-0.71	0.72	-0.11	0.32	0.49	-0.26	-0.36	0.23	0.08	-0.37
Pb	0.10	-0.62	0.23	0.12	0.67	0.49	-0.50	0.43	0.24	0.38	0.74	-0.71	1.00	-0.86	0.41	-0.14	-0.21	-0.33	-0.09	0.10	0.51	0.68
Si	0.03	0.65	0.04	0.11	-0.36	-0.22	0.12	-0.12	-0.09	0.01	-0.64	0.72	-0.86	1.00	-0.15	0.21	0.06	0.39	-0.28	-0.41	-0.30	-0.58
Sr	0.88	0.37	0.97	0.92	0.91	0.98	-0.31	0.99	0.93	0.88	0.79	-0.11	0.41	-0.15	1.00	0.73	0.39	-0.29	-0.62	0.18	0.27	0.80
Ti	0.95	0.81	0.74	0.92	0.42	0.61	0.04	0.71	0.72	0.42	0.37	0.32	-0.14	0.21	0.73	1.00	0.84	-0.43	-0.29	0.42	0.20	0.33
V	0.67	0.60	0.37	0.58	0.14	0.28	0.43	0.37	0.45	-0.02	0.29	0.49	-0.21	0.06	0.39	0.84	1.00	-0.71	-0.02	0.79	0.28	0.17
Zn	-0.33	0.05	-0.16	-0.31	-0.35	-0.26	-0.17	-0.35	-0.22	0.04	-0.53	-0.26	-0.33	0.39	-0.29	-0.43	-0.71	1.00	0.05	-0.79	-0.79	-0.29
CXC	-0.32	-0.12	-0.71	-0.49	-0.71	-0.70	0.08	-0.68	-0.65	-0.84	-0.46	-0.36	-0.09	-0.28	-0.62	-0.29	-0.02	0.05	1.00	0.13	-0.16	-0.49
CP	0.30	0.06	0.11	0.18	0.13	0.16	0.64	0.14	0.32	-0.20	0.48	0.23	0.10	-0.41	0.18	0.42	0.79	-0.79	0.13	1.00	0.24	0.36
IPA	0.18	-0.23	0.10	0.27	0.43	0.25	-0.40	0.38	-0.00	0.13	0.38	0.08	0.51	-0.30	0.27	0.20	0.28	-0.79	-0.16	0.24	1.00	0.13
Shannon	0.53	-0.13	0.74	0.52	0.88	0.87	-0.06	0.76	0.84	0.72	0.96	-0.37	0.68	-0.58	0.80	0.33	0.17	-0.29	-0.49	0.36	0.13	1.00

XI. Discusión

Caracterización morfológica y abundancia por cobertura

Los líquenes encontrados pudieron determinarse taxonómicamente por los estudios previos que están realizados en México y en el mundo, específicamente para la Ciudad Universitaria; de las 30 especies liquenáceas descritas por Herrera-Campos y Lucking (2008), se encontraron 10 de ellas. Los biotipos folioso y costroso, fueron los crecimientos encontrados sobre la roca expuesta coincidiendo en que no se presenta para este ecosistema el tipo fruticoso. En los pedregales más expuestos a las emisiones contaminantes, el crecimiento folioso fue mayor, siendo de un 5 a un 20 % más que lo reportado por Herrera-Campos y Lucking (80%) y tendiendo a ser más similar a lo encontrado por estos autores en las zonas núcleo. La mitad de las especies descritas por ellos se determinaron como saxícolas y entre ellas, sólo cinco no fueron encontradas en este trabajo (*Caloplaca cf. velana* (A. Massal.); *Xanthoparmelia amableana* (Gyeln) Hale; *Xanthoparmelia isidiigera* (Müll. Arg.) Elix & J. Johnst; *Xanthoparmelia subcumberlandia* Elix & T. H. Nash y *Xanthoparmelia neoconspersa* (Gyeln.)). Igualmente se encontró que los representantes del género *Xanthoparmelia* siguen dominando la diversidad del sustrato rocoso. Los líquenes son especies que permanecen expuestas a condiciones de intemperismo muy diferenciales en este ecosistema con tantos microambientes y esto puede repercutir en variaciones ya sea de cambio de coloración, tamaño, etc. Los microambientes en la REPSA presentan condiciones muy variables en la exposición a la luz, la incidencia de temperatura y humedad relativa y esto puede afectar su crecimiento y composición de especies de manera más determinante que el impacto de la contaminación. Aunque de manera consecuente, la exposición a las emisiones vehiculares y a la lluvia y humedad ambiental que contiene las partículas contaminantes, también es diferente de acuerdo a los microambientes, por lo que un efecto de mayor exposición podría esperarse en sitios planos, paredes y promontorios sobre cuevas y grietas. Si bien en este estudio no se relacionó el aspecto de los líquenes en cada zona, el criterio de abundancia y presencia o ausencia fue el que se consideró para ver si podría reflejar alguna posible afectación por contaminación atmosférica (Hawksworth et

al., 2005). Sin embargo, los resultados no mostraron evidencia significativa a una escala local, por lo que, las concentraciones de elementos en la especie más abundante, representada en todos los sitios, indica que su bioacumulación estaba relacionada con la exposición. Respecto al índice de diversidad de Shannon se observó que las Zonas Núcleo no presentaron grandes diferencias en su diversidad, los sitios con similitudes fueron el Pedregal Remanente No. 42 y el Sendero Ecológico y el Geopedregal y el Molotito de la Facultad de Ciencias tuvieron diferencias muy significativas; siendo este último el que presentó el valor mas alto respecto a su diversidad aun cuando éste se encontraba a una exposición de tránsito vehicular similar.

Índice de Pureza Atmosférica

El Índice de Pureza Atmosférica nos indicó que la calidad del aire fue mayor en el Molotito que aunque es un pedregal expuesto al paso vehicular, tiene mucha vegetación alrededor, coincidiendo con la zona núcleo poniente. El Pedregal Remanente 42 fue el que presentó una menor calidad a pesar de que las concentraciones de elementos en *X. conspersa* no fueron las mayores. Se hubiera esperado que así fueran ya que está ubicado al paso de diferentes vehículos como el transporte Metrobus, que circula todos los días desde el 2005 en esta avenida y utiliza diésel bajo en Azufre como combustible (Martín, 2014). Por otro lado, nuevas unidades utilizan combustible ecológico biodiésel (B5 BRV) bioreductor de viscosidad (Hernández, 2018).

Cohn-Berger (2014) utilizó el IPA para conocer la calidad del aire para la ciudad de Guatemala; el estudio se enfocó en los líquenes que colonizaron la corteza de los árboles de jacaranda (*Jacaranda mimosifolia* D. Don.) en el corredor metropolitano Hipódromo del Norte-Hipódromo del Sur. Los valores de IPA variaron de 4.5 a 25.5 indicando que el corredor es homogéneo y posee altos índices de contaminación aérea, corroborando de esta forma que los líquenes son especies toxitolerantes y toxisensibles a la contaminación atmosférica. La riqueza, la abundancia y la concentración de elementos son tres parámetros que sirven para detectar si los pedregales de la CU están siendo afectados por las emisiones y se

observa que es muy probable que las especies adaptadas puedan estar recibiendo diferentes aportes de contaminantes debido a las condiciones de microambiente, que la superficie de cobertura no necesariamente responde a un factor de afectación así como las concentraciones en el líquen más abundante.

Cuantificación de contaminantes elementales retenidos en tejido vegetal del líquen afín a *Xanthoparmelia conspersa*

La mayor parte de la evidencia que se tiene sobre efecto de la contaminación del aire ha documentado las emisiones gaseosas de NO_x, CO, O₃, SO₂, Pb y partículas PM₁₀, 2.5 (Trejo-Medina, 2008; Mendoza-Lara, 2016). El inventario de emisiones contaminantes de la CDMX 2014, adjudica emisiones de hasta 60 000 kg por año de Ba, Mn, P, Al y Pb que constituyen el 3% en peso del PM_{2.5} (SEMARNAT, 2016). Las principales fuentes emisoras son diversas, muchas de ellas que utilizan solventes, como “el recubrimiento de superficies arquitectónicas (pinturas) y el pintado automotriz, uso de selladores y adhesivos, así como por la combustión y evaporación de las gasolinas”. Los metales llegan a los líquenes por diferentes fuentes, el As proviene de la actividad minera e industrial, el V a la emisión de gases producto de la combustión del petróleo por vehículos pesados. El Al es resultado de la fabricación industrial de utensilios, envases, materiales de construcción y pinturas. El Pb, es resultado de la combustión vehicular derivados del petróleo. El Co es emitido por la industria metalúrgica, por otro lado el Mn y Zn están relacionados con las industrias del acero, pero también el Zn es resultado de del desgaste de los motores vehiculares, es decir la abrasión de los neumáticos. El Cd es liberado por el desgaste sufrido por los neumáticos y la industria del acero (Méndez-Estrada y Monge-Nájera, 2011). Los contaminantes que son más comunes en las ciudades son el SO₂, los NO_x, O₃, partículas suspendidas, metales pesados e hidrocarburos (Anze *et al.*, 2007).

Las concentraciones de algunos contaminantes que pueden ser adjudicados a estas emisiones fueron significativamente distintas para algunas de ellas en los sitios donde su exposición a la afluencia vehicular fue más alta como es el caso del Molotito de Ciencias, el Geopedregal y la zona aledaña a Insurgentes. Las

concentraciones más altas de contaminantes y que fueron constantes en todos los sitios de estudio fueron: Al, Cu, Fe, Pb, Sr, V y Zn, esto se puede atribuir ya los líquenes son organismos longevos y perennes que están expuestos a la contaminación y por lo tanto son sensibles a ellos. Varios de estos elementos pueden proceder del material particulado en sus distintas fracciones (Viana-Rodríguez, 2013; SEMARNAT; 2016). Esto explica algunas de las concentraciones elevadas que se encontraron en los tejidos de *X. conspersa* como el Al que obtuvo valores muy altos en cada sitio. Mendoza-Montiel (2016) que realizó un estudio con los contaminantes elementales retenidos en las hojas de *Buddleja cordata* Kunth en la Ciudad Universitaria, observó que los contaminantes provenientes de la quema de combustibles fósiles de los automóviles en los sitios donde la afluencia vehicular es muy alta, fueron entre los determinados, Ba, Cr, Cu Hg, Mn, Na, Ni, Pb, Se, V y Zn. Encontró que las concentraciones más altas fueron de Al, Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn se presentaron en árboles ubicados en la lateral de la Av. Insurgentes. y donde estableció los intervalos de variación de algunos elementos. A efecto de establecer un comparativo de las concentraciones obtenidas por Mendoza y este estudio, en el Tabla 12 se observa la media de concentración de los elementos que fueron leídos en la Ciudad Universitaria.

Tabla 12. Análisis comparativo de las concentraciones promedio de algunos elementos en hojas de tepozán *Buddleja cordata* y *Xantoparmelia conspersa* en la Ciudad Universitaria de la UNAM, CdMx.

	Intervalo de concentración De Bruin (1990) (mg/kg)	<i>Buddleja cordata</i> Kunth Mendoza (2016) (mg/kg)	Líquenes saxícolas (Alva 2017) (mg/kg)
Al	230 – 21000	182.17	1822.61
As	0.5 – 17	<LD	1.42
Ba	n.d.	15.10	20.88
Cd	0.6 - 21	<LD	1.59
Co	0.20 – 6.3	<LD	1.10
Cr	4.0 - 270	0.80	4.17
Cu	1.4 - 120	9.56	54.99
Fe	720 - 30000	194.40	2355.22
Li	40 - 110	0.38	1.04
Mn	16 - 400	23.61	36.08
Ni	1.9 - 51	0.47	6.73
P	30 - 50	n.d.	32.55
Pb	3.1 - 370	0.48	600.44
Si	100 - 200	n.d	31.37
Sr	8.5 - 400	38.03	136.11
Ti	n.d.	<LOD	7.60
V	5.7 - 99	0.52	101.18
Zn	61 - 1100	17.27	1344.76

<LD = Bajo nivel de detección; n. d.=no detectado

Podemos observar que la concentración de contaminantes en los líquenes resultó casi diez veces mayor que en las hojas de tepozán ya que los líquenes son organismos que presentan una gran longevidad, son perennes y acumulan elementos en los sitios donde se presenten, por lo tanto, se demuestra que son mucho mejores como bioindicadores de contaminación atmosférica.

Bargagli (1998) realizó estudios sobre biomonitoreo en ambientes urbanos con líquenes y hojas de roble, donde encontró trazas de Ba provenientes de los tubos de escape de los vehículos que utilizan diésel con y sin plomo; en la Ciudad Universitaria circula el transporte Pumabus que utiliza diésel, por lo tanto los organismos vegetales lo absorben y bioacumulan en sus tejidos, como es el caso del Geopedregal y el Molotito de la Facultad de Ciencias. En caso del Geopedregal, que resultó uno de los sitios que acumularon en mayor cantidad varios elementos, se encuentra aledaño al mismo, la incineración de la Facultad de Veterinaria y el ducto de gases de aguas residuales, por lo que es altamente

probable que gran parte de los elementos que se acumulan en este sitio, provengan de esta fuente emisora además de los vehículos que pasan regularmente al costado del mismo.

Por el contrario, el caso del Pedregal Remanente 42 ubicado a un costado de Insurgentes, resultó que no fue uno de los sitios en los que los líquenes acumularan en mayor concentración los contaminantes como se esperaba. Al parecer, las superficies foliares son más sensibles a recibir las PM y por tanto a retener el impacto de partículas en esta avenida y posiblemente la absorción atmosférica arroje que aunque es más elevada para muchos elementos en los sitios expuestos a mayor paso vehicular, el mayor contenido se concentre en las PM y haya acumulación de elementos en la materia orgánica del suelo. Por eso, hacer un estudio de digestión de diferentes especies, puede indicar con mayor precisión si también hay acumulación significativa de estos elementos o dirigir a microescala una recolecta en sitios abiertamente expuestos a las emisiones ya que el efecto de microambiente y cobertura también pueden jugar un papel importante como barrera en la bioacumulación.

La correlación de Pearson mostró que los elementos que tuvieron una alta asociación como los pares Cd-Al-Ti y Ba-Fe-Li-Sr comparten fuentes de emisión similares. Huanng y cols. (1994) realizaron un estudio sobre la emisión de los automóviles y encontraron que el Al se encuentra en grandes cantidades en los automóviles con convertidores catalíticos modernos (γ -Al₂O₃) de los convertidores convencionales. La mayor parte de estos elementos se encuentran en partículas finas menores a 2.5 que son altamente solubles y se dispersan de manera homogénea por lo que es posible que estén suspendidas en todo el campus y su bioacumulación en los líquenes sea muy similar (INE-SEMARNAT, 2011).

XII. Conclusiones

Los resultados obtenidos en la presente investigación constatan que los líquenes saxícolas resultan bioindicadores sensibles a la contaminación atmosférica en los pedregales de la Ciudad Universitaria. La caracterización morfológica de los líquenes saxícolas en los mismos permitió distinguir a *Xanthoparmelia consersa* como la especie más representativa y abundante en varios sitios y microambientes.

La superficie de cobertura de los líquenes no está relacionada directamente con la exposición de los pedregales a las emisiones vehiculares, si no más bien por las condiciones de microambiente.

La evaluación de los tejidos del líquen más abundante por el método de ICP-OES permitió conocer algunos de los elementos contaminantes y constatar que se acumulan significativamente más en comparación con las hojas del tepozán. También se constató que existe una acumulación diferencial por microambiente de algunos de los elementos en estos tejidos y que por el sitio, no siempre está directamente relacionada a la cercanía a emisiones vehiculares.

El Índice de Pureza Atmosférica (IPA) coincidió también en que los pedregales menos cercanos a las emisiones presentaron valores más elevados exceptuando un pedregal muy diverso y conservado que se encuentra en la Facultad de Ciencias. Esto pone de manifiesto que los pedregales remanentes resguardan parte importante de la diversidad de la reserva y son purificadores del aire circundante. El Geopedregal, como uno de los pedregales más expuestos a la contaminación, a pesar de no tener el valor más bajo de pureza ambiental, si tiene los valores de elementos contaminantes mayores debido posiblemente a las fuentes emisoras de gases de la Facultad de Veterinaria y del ducto de las aguas residuales. El Pedregal Remanente no. 42. que sí está situado a un lado de la Av. Insurgentes, tiene los valores menores de IPA y una acumulación mayor de algunos contaminantes.

XIII. Literatura citada

- Ammann, K., Liebendorfer, L., Herzing, R., Urech, M. (1987). Multivariate correlation of deposition data of 8 different air pollutants of lichen data in a small town in Switzerland. En: Pp. 401-406, Systemtish-Geobotanisches. Institut der Universität Bern, Switzerland.
- Anze, R., Franken, M., Zaballa, M., Pinto, M., Zeballos, G., Tablas, M. Á., Canseco, Á., De la Rocha, A., Estellano, V.H., Del Granado, S. (2007). Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia. *Revista Virtual REDESMA*, 1, 54–74.
- Aspiazu, J. L., Cervantes, J., Ramírez, J., López, R., Ramos, R., Muñoz, P., Villaseñor, P. (2007). Temporal and spatial trends studied by lichen analysis: atmospheric deposition of trace elements in Mexico. *Revista Mexicana de Física* 53, 87–96.
- Asta, J., Erhardt, W., Ferretti, M., Fornasier, F., Kirschbaum, U., Nimis, P. L., Purvis, O. W., Pirintsos, S., Scheidegger, C., Van Haluwyn, C., Wirth, V. (2002). Mapping lichen diversity as an indicator of environmental quality in Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens. Nimis, P. L., Scheidegger, C. and Wolseley, P. A. (Eds.). (273-279). Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Badilla-Cruz, R. R. (1977). Estudio petrológico de la lava de la parte nueva del Pedregal de San Ángel, DF. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 38, 40 - 57.
- Bargagli, R. (1998). Trace elements in terrestrial plants: an ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg and R.G. Landes Company, Georgetown, TX, USA. Pp. 153-177.
- Barreno-Rodríguez, E., Pérez-Ortega, S. (2003). Los líquenes y el medio. Ordenación Del Territorio e Infraestructura Del Principado de Asturias,

1(1), pp. 84–90. Consejería de Medio Ambiente, España.

Barreno-Rodríguez, E., Pérez-Ortega, S. (2003b). Biología de los líquenes. Líquenes de La Reserva Natural Integral de Muniellos, Asturias. Pp. 65–82. Conserjería de Medio Ambiente y KRK ediciones, España.

Bedregal, P., Torres, B.; Mendoza, P., Ubillús, M., Hurtado, J., Maza, I. y Espinoza, R. (2005). Uso de *Usneasp.* y *Tillandsia capillaris*, como bioindicadores de la contaminación ambiental en la ciudad de Lima, Perú. Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN). Informe científico y tecnológico. 151-156 p.

Bello, J., López de Cerain, A. (2001) Fundamentos de Ciencias y Toxicológica. Universidad de Navarra. Edición Díaz de Santos, S. A, España.

Bosch, P., Barca, D., Mirocle, G., Lalli, C. (2010). Estudio sobre los Líquenes como bioindicadores del contenido de metales pesados en el entorno de la Iglesia de los Santos Juanes de Valencia. Estudos de conservação e restauro, 2, 21-37.

Brightman, F. H., Seaward, M. R. D. (1977). Lichen Ecology. MRD Seaward (Ed.), Academic Press, Londres y Nueva York.

Brodo, I., Duran-Sharnoff, S., Sharnoff, S. (2001) Lichens of North America. Yale University Press. 795 p.

Budka, B., Mesjasz-Przybylowicz, J., Przybylowicz, W. (2004). Environmental pollution monitoring using lichens as bioindicators: a micro-PIXE study. Radiation Physics and Chemistry, 71, 783–784.

Cano-Santana, Z. (1994). Flujo de energía a través de *Sphenarium purpurascens* (Orthoptera: Acridae) y productividad primaria neta aérea de una comunidad xerófila. Tesis Doctoral en Ecología, Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 198 p.

- Carballal, R., Caseres-Porcel, Gutiérrez, M. L., García-Rowe, J. (2006). Introducción a los líquenes. Pp. 157-188. Proyecto Andalucía Enciclopedia de la Naturaleza, Tomo XXI. Editorial Giralda.
- Carrillo-Padrón, V. H. (1993). Líquenes foliosos como biomonitores de contaminación atmosférica por metales pesados en los alrededores en la zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 91 p.
- Castillo-Argüero, S., Montes-Cartas, G., Romero-Romero, M. A., Martínez-Orea, Y., Guadarrama-Chávez, P., Sánchez, Gallén, I., Núñez-Castillo, O. (2004). Dinámica y conservación de la flora del matorral xerófilo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (D. F., México). Boletín de la Sociedad Botánica de México 74: 51-75.
- Castillo-Argüero, S., Martínez, Y., Romero, M. A., Guadarrama, P., Núñez, O., Sánchez, I., Meave, J. A. (2007). La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Aspectos florísticos y ecológicos. Universidad Nacional Autónoma de México. 294 p.
- Castro, F. B. De, Müller, A., Schmitz, M. F. (1990). Líquenes fijadores de nitrógeno atmosférico. Ecología, 4, 131–141. Madrid, España.
- Centro Mexicano del Derecho Ambiental (CEMDA) Calidad del aire. (2017). En <http://www.cemda.org.mx/calidad-del-aire/>, fecha de última consulta: 10 diciembre del 2018.
- Cepeda, J., García, J. (1998). The effect of air pollution from nitrogen dioxide (NO₂) on epiphytic lichens in Seville, Spain. Aerobiología, 14: 241–247.
- Cohn-Berger, M. G. (2014). Líquenes como bioindicadores de contaminación aérea en el corredor metropolitano Hipódromo del Norte-Hipódromo del Sur, en la ciudad de Guatemala. Tesis de Licenciatura, Universidad de San Carlos. Guatemala. 98 p.

- CONAFOR (Consejo Nacional de Floricultura). (2011). Manual de procedimientos para el muestreo en campo. SEMARNAT. Jalisco, México. 140 p.
- Contreras, A. M., García, G., Icaza, B. (2013). Calidad del aire: Una práctica de vida. Ed. SEMARNAT, México D.F. 26 p.
- Cristofolini, F., Giordani, P., Gottardini, E., Modenesi, P. (2008). The response of epiphytic lichens to air pollution and subsets of ecological predictors: A case study from the Italian Prealps. *Environmental Pollution*, 151, 308–317.
- Cubas, P., Núñez, J., Crespo, A., Divakar, P. (2010). Líquenes : qué son y su uso como bioindicadores. *GEMM / Proyecto de Innovación* 123, 1–9.
- De Bruin, M. (1990). Indicadores biológicos y análisis por activación neutrónica en estudios de la contaminación atmosférica con metales pesados. Los musgos, la corteza de los árboles, los líquenes y otros materiales pueden revelar información importante sobre la contaminación ambiental y sus probables fuentes. 6 p. En: https://www.iaea.org/sites/default/files/32405692227_es.pdf, fecha de última consulta: 10 diciembre del 2018.
- Delgado, H., Molinero, R., Cervantes, P., Nieto-Obregón, Lozano-Santa Cruz, R., Macías-González, H. L., Silva-Romo, G. (1998). Geology of Xitle volcano in southern Mexico City, a 2000 year-old monogenetic volcano in an urban area. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 15, 115-131.
- Enciso de la Vega, S. (1994). Las lavas del Pedregal. Reserva Ecológica Del Pedregal de San Ángel. *Ecología Historia Natural y Manejo*. En: http://www.repsa.unam.mx/documentos/Enciso_1994_Lavas_pedregal.pdf, fecha de última consulta: 10 diciembre del 2018.
- Fries, C. Jr. (1960) Geología del estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México. Universidad

Nacional Autónoma de México. Boletín del Instituto de Geología 60, 236 p.

Ferretti, M., Brambilla, E., Brunialti, G., Fornasier, F., Mazzali, C., Giordani, P., Nimis, P. L. (2004). Reliability of different sampling densities for estimating and mapping lichen diversity as bioindicator of environmental quality. *Environmental Pollution*, 127(2), 249-256.

Froehlich, A. (2006). A look at Willamette valley air quality using lichen communities as bioindicators. *Research Based Learning*, 49, 377-389.

Fuga, A., Saiki, M., Marcelli, M., Saldiva, P. (2008). Atmospheric pollutants monitoring by analysis of epiphytic lichens. *Environmental Pollution*, 151, 334-340.

Gaceta UNAM digital. Hernández, M. (2018). Diez unidades más del Pumabús. En: <http://www.gaceta.unam.mx/diez-unidades-mas-del-pumabus/> última consulta: 10 diciembre del 2018.

García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. 98 p.

García, L., Rubiano, O. (1984). Comunidades de líquenes como indicadores de niveles de calidad del aire en Colombia. *Contaminación Ambiental*, 8, 73-90.

Gilbert, O., Giavarini, V. (2000). The lichen vegetation of lake margins in Britain. *Lichenologist* 32, 365–386.

Giordani, P. (2007). Is the diversity of epiphytic lichens a reliable indicator of air pollution? A case study from Italy. *Environmental Pollution*, 146, 317-323.

Godínez, J. L., Ortega, M. M. (1989). Lichenología de México. Historia y bibliografía. Cuadernos del Instituto de Biología, UNAM. México, D. F. 46 p.

- Gonzales-Vargas, N., Luján-Pérez, M., Navarro-Sánchez, G. Flores- Mercado, R. (2016). Aplicabilidad de líquenes bioindicadores como herramienta de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Cochabamba. *Acta Nova* 7, 4, 455-482.
- González, M. C., Tenorio, M. A. (1993). Heavy metals biomonitoring in the Mexico City metropolitan area. *International Conference of Monitoring of Toxic Chemicals and Biomarkers*, 1716, 188 - 198 doi:10.1117/12.140256
- Gregorio, M. R., Gómez, M., Álvarez, I. (2016). Líquenes cortícolas de las áreas urbanas y suburbanas de Morelia, Michoacán, México. *Botanica complutensis*. 40, 9–21.
- Hawksworth, D. L., Iturriaga, T., Crespo, A. (2005). Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. *Revista Iberoamericana de Micología*, 22(2), 71–82.
- Herrera-Campos, M. A., Lücking, R. (2008). Líquenes. En: pp. 81-85. Lo, A., Cano-Santana, Z. Eds. *Biodiversidad del Ecosistema del pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Herrera-Campos, M., Lücking, R., Pérez-Pérez, R. E., Miranda-González, R., Sánchez, N., Barcenas-Peña, A., Carrizosa, A., Zambrano, A., Ryan, B., Nash, T. H. (2014). Biodiversidad de líquenes en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85 (SUPPL.), 82–99.
- Huang, X., Olmez, I., Aras, N. K., Gordon, G. E. (1994). Emissions of trace elements from motor vehicles: potential marker elements and source composition profile. *Atmospheric Environment*, 28 (8), 1385-1391.
- Instituto de Geología. Ortega-Larrocea, M. del P. *Geopedregal*. (2013). Universidad Nacional Autónoma de México. Geopedregal. Disponible en: <http://www.geologia.unam.mx/contenido/geopedregal>. Última consulta 21 de diciembre del 2018.

- INE-SEMARNAT (Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente, recursos Naturales y Pesca). (2011). Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM de 2.5. INE-SEMARNAT, México. 106 p.
- Jaramillo, M., Botero, L. (2010). Comunidades líquénicas como bioindicadores de calidad del aire. *Gestión y Ambiente*, (1), 97–110.
- Jeran, Z., Jacimovic, R., Batic, F., Mavsar, R. (2002). Lichens as integrating air pollutin monitors. *Great Britain, Environmental Pollution*, 120, 107–113.
- Kuralaratne, K., de Freitas, C. (2013). Epiphytic lichens as biomonotors of airborne heavy metal pollution. *Environmental and Experimental Botany*, 88, 24-32.
- Le Blanc, F., De Sloover, J. (1970). Relation Between Industrialization and the Distribution and Growth of Epiphitic Lichens and Mossees in Montreal. *Canadian Journal of Botany*, 48, 1486-1496.
- Lepp, de H. Los líquenes de Australia: La reproducción y la dispersión. Herbario Nacional de Australia. (2012). En: <http://www.cpr.gov.au/lichen/reproduction-dispersa.html>. Fecha de última consulta 21 de diciembre de 2018.
- Liebendoerfer, L., Herzig, L., Urech, M., Ammann, K. (1988). Evaluation und Kalibnerung der Schweizer Flechten-Indlkatlonsmethode mit wichtlgen Luftschadstoffen. *Staub-Reinhaltung der Luft*, 48, 233-8.
- Lijteroff, R., Lima, L., Prieri, B. (2009). Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(2), 111–120.
- Lot, A. (2008). Mirar para entender el paisaje del Pedregal. En: pp. 9-11. SEREPSA Manual de procedimientos del Programa de Adopción de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (PROREPSA).

Secretaría Ejecutiva REPSA, Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, México, D.F.

Lot-Helgueras, A., Pérez-Escobedo, M., Gil-Alarcón, G., Rodríguez-Palacios, S., Camarena, P. (2012). La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: Atlas de riesgos. UNAM. ICyTDF, Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, México, D.F. 52 p.

Lot, A., Pérez Escobedo, M., Gil Alarcón, G., Rodríguez Palacios, S., Camarena, P. (2012). La Reserva Ecológica Del Pedregal De San Ángel: Atlas De Riesgos. Universidad Nacional Autónoma de México, Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, México, D.F. 60 p.

Marcovecchio, J., Freije, R. (2013). Programas de monitoreo en estuarios: estudios a largo plazo. Procesos Químicos en Estuarios. Universidad Nacional del Sur. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. Universidad Nacional Autónoma de México. Environmental Institute of Scientific Networks. 394 p.

Martín, A. (2014). Metrobús y Ecobici, las claves del transporte verde en la Ciudad de México. Twenergy. El Portal de la eficiencia energética de Endesa. En: <https://twenergy.com/mx/a/metrobus-y-ecobici-las-claves-del-transporte-verde-en-la-ciudad-de-mexico-1421>, fecha de última consulta: 10 de diciembre del 2018.

Martínez-Mateos, A. E. (2001). Regeneración natural después de un disturbio por fuego en dos microambientes contrastantes de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel México. Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 66 p.

McCune, B. (2009). Macrolichens of the Pacific Northwest. Oregon State University Press; 2nd. edition. 499 p.

Méndez-Estrada, V., Rossi, H., Monge, R. (2006). Aplicación de un método sencillo para medir la contaminación atmosférica: una experiencia

comunitaria hecha en Costa Rica. En: <https://www.uned.ac.cr/ecologiaurbana/images/pdf/aplicacion.pdf>, fecha de última consulta: 10 de diciembre del 2018.

Méndez-Estrada, V. H., Monge-Nájera, J. (2011). El uso de líquenes como biomonitores para evaluar el estado de la contaminación atmosférica a nivel mundial. *Biocenosis*, 25, 51–67.

Mendoza-Lara, O. O. (2016). Influencia y transporte de la contaminación generada en la zona metropolitana del Valle de México en la Calidad del Aire en el Valle de Puebla. Maestría en Ingeniería, UNAM. 200 p.

Mendoza-Montiel, J. A. (2016). Evaluación de contaminantes foliares y producción de biomasa aérea en *Buddleja cordata* Kunth en la Ciudad Universitaria de la UNAM, México D. F. Tesis de Licenciatura, FES-Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. 87 p.

Montañez, A. L., Countiño, B. (2000). Los líquenes. En: Pp. 59-65. Laboratorio de Etnobotánica, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias. UNAM, México, D. F.

Nava-López, M., Jujnovsky, J., Salinas, R., Almeida, J. Á. (2009). Servicios ecosistémicos. En: Pp. 51–60. Lot A., Cano-Santana, C. (Eds.). Biodiversidad del Ecosistema del Pedregal de San Ángel. UNAM, México.

Navarrete, S., Camargo, J. (2016). Informe: Laboratorio de hongos liquenizados. Prototipo específico de estructuras morfológicas de los hongos liquenizados. Biología Vegetal I. En: <http://biologiavegetali-sofiayyessica.blogspot.com/> 2016/12/informe-laboratorio-de-hongos.html, última revisión, 10 diciembre del 2018.

Negendank, J. F. W. (1972). Volcanics of the Valley of Mexico. Pt. 1: Petrography of the volcanics. - N. Jb. Miner. Abh., 116, 308–320, Stuttgart.

Nimis, P. L., Castello, M., Perotti, M. (1990). Lichens as biomonitors of sulphur dioxide pollution in La Spezia (northern Italy). *The Lichenologist*, 22(3), 333–344.

Norma Oficial Mexicana. NOM-040-ECOL-2002. Protección ambiental. Fabricación de cemento hidráulico. Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera. Diario Oficial de la Federación. En: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=716313&fecha=18/12/2002 Última consulta 21 de diciembre del 2018.

Obbard, J. P., Ng., O. H., Tan, B. C. (2006). Lichens as bioindicators of Atmospheric heavy metal pollution in Singapore. *Environmental Monitoring and Assessment*, 123, 63-74.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. En: <http://www.who.int/es>, fecha de última consulta: 10 de diciembre del 2018.

Policnik, H., Simoncic, P., Batic, F. (2008). Monitoring air quality with lichens: A comparison between mapping in forest sites and in open areas. *Environmental Pollution*, 151, 395–400.

Ramírez-Morán, N. A., León-Gómez, M., Lücking, R. (2016). Uso de biotipos de líquenes como bioindicadores de perturbación en fragmentos de bosque altoandino (reserva biológica “Encenillo”, Colombia). *Caldasia*, 38(1), 31–52.

Roig, P. B., Barca, D., Crisci, G. M., Lalli, C. (2010). Estudio sobre los Líquenes como bioindicadores del contenido de metales pesados en el entorno de la Iglesia de los Santos Juanes de Valencia, 21–37.

Rojas-Fernández, J. A., Balza-Quintero, A., Marcano, V., Rojas, P. A., Dávila-Vera, D., Peña-Contreras, Z., Mendoza-Briceño, R. V. y Palacios-Prü, E. (2008). Metabolitos secundarios de líquenes de la zona nival de la Sierra

Nevada de Mérida-Venezuela y su papel en la absorción de la radiación ultravioleta. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 65, 59-72.

Rzendowski, J. (1954). Vegetación del Pedregal de San Ángel (D.F., México). Tesis de licenciatura, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional. 129 p.

Rzendowski, G., Rzendowski, J. (2001). Flora fanerogámica del Valle de México. 2ª ed. Instituto de Ecología A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro, Michoacán. México. 1046 p.

Santibáñez-Andrade, G. (2005). Caracterización de la heterogeneidad ambiental en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 67 p.

Santoni, C. S., Lijteroff, R. (2006). Evaluación de la calidad del aire mediante el uso de bioindicadores en la Provincia de San Luis, Argentina. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 22(1), 49–58.

Schmitter, E. (1953), Investigación Petrológica en Las Lavas del Pedregal de San Ángel: Mem. Congr. Cient. Mex. III, 218-237.

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente). (2017). Dirección de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. En: <http://www.aire.CdMx.gob.mx/>, fecha de última consulta: 11 diciembre del 2018.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2003). Contaminación. SEMARNAT, 26, 122–154.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México). (2016). Inventario de Emisiones de la CDMX. Contaminantes criterio, Tóxicos y efecto invernadero. SEDEMA, 134 p.

Servicio de Sanidad Forestal y Equilibrios Biológicos. (2005). Manual Red Ce Nivel

II. Comisión Económica para Europa de Naciones Unidas. convenio marco de Contaminación Atmosférica transfronteriza. España. 225 p.

Siebe, C. (2009). La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670 +/-35 años AP y sus implicaciones. En: pp. 43-49. Lo, A., Cano-Santana, Z. Eds. Biodiversidad del Ecosistema del pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Siebe, G. C. D., Mendoza-Hernández, P. E., Juárez O. M., Vázquez S- L., Cram, H. S. (2016). Consecuencias de la actividad volcánica del Xitle y el disturbio antrópico sobre las propiedades del suelo y la diversidad vegetal del Parque Ecológico de la Ciudad de México en el Ajusco medio. En: Pp. 75-91. La biodiversidad de la Ciudad de México. CONABIO-SEMARNAT, México.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México). (2018zambra). Inventario de Emisiones de la CDMX. Contaminantes criterio, Tóxicos y efecto invernadero. SEDEMA, 134 p.

Spribille, T., Tuovinen, V., Resl, P., Vanderpool, D., Wolinski, H., Aime, M. C., McCutcheon, J. P. (2016). Basidiomycete yeasts in the cortex of ascomycete macrolichens. *Science*, 353(6298), 488–492.

Tapia, W., Andrade, M. (2011). Caracterización de la concentración de Ozono superficial en la Ciudad de la Paz, en el régimen de madrugada. Characterizing surface Ozone concentration in the city of La Paz during early morning regimen. *Revista Boliviana de Física*, 18, 26-36.

Trejo-Medina, N. 2008. Estudio de la contaminación atmosférica en tres sitios perimetrales de la Ciudad de México: Santa Ana, Xicalco y ãvila Camacho. Tesis doctoral, Posgrado en Ciencias Químicas, UNAM. 101 p.

US-EPA (United States Environmental Protection Agency). (1996). Method 3052: Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based

matrices. En: Test Methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods SW-846. US Government Printing Office (GPO), Washington, DC, USA. 20 p.

US-EPA (United States Environmental Protection Agency). (2016). Contaminación Atmosférica. Contaminación aérea y riesgo de salud. En: https://www3.epa.gov/ttn/atw/3_90_022sp.html, fecha de última consulta: 10 de diciembre del 2018.

Viana-Rodríguez, M. D. M. (2003). Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias. Tesis doctoral, Universitat de Barcelona.

Wall, M. (2017). Servicio ecosistémico de regulación de un pedregal remanente: características térmicas. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 100 p.

Zambrano, A., Nash, T. H. (2000). Lichen responses to short-term transplantation in Desierto de los Leones, Mexico City. *Environmental Pollution*, 107(3), 407–412.

Zambrano, A., Nash, T. H., Gries, C. (1999) Physiological Effects of the Mexico City Atmosphere on Lichen Transplants on Oaks. *Journal Environmental Quality*, 28, 1548- 1555.

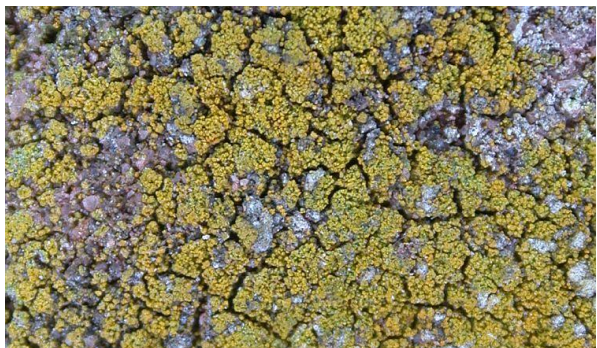
Zambrano, A., Nash, T. H. Herrera, M. (2002) Lichens and Air Pollution in the forest surrounding, Mexico City. *Urban Air Pollution and Forest*. M. E. Fenn *et al.* (eds.). Pp: 283-284.

Zambrano, L., Rodríguez-Palacios, S., Pérez-Escobedo, M., Gil-Alarcón, G., Camarena, P., Lot, A. (2016). La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: Atlas de Riesgos. Universidad Nacional Autónoma de México.

XIV. Anexos

Anexo 1. Catálogo de las especies de líquenes saxícolas encontradas en la Ciudad Universitaria según Brodo y cols. (2001).

Caloplaca citrina (Hoffm.) Th. Fr.



Hábito de vida: Talo: costroso, margen ligeramente lobulado, sin lóbulos alargados; superficie: amarillo-naranja, soledio: fina, en amarillo, en corteza irregular, laminar celular, 2030 μm de grosor, ausencia de gránulos; apotecios: raro, 0.2-0.3 mm en diámetro, disco: anaranjado, plano: que consiste en hifas radiadas o celulares (paraplectenquimatosas); dorado, K + rojo, H-, 10% N-, cN-, C-. Ascosporas: hialino 2 lóbulos, elipsoide, 11-15 x 5.5-7 μm , istmo 2.8-4.2 μm , pared del extremo de la espina delgada. Picnidio: presente, totalmente sumergida, ostiolo naranja. Pruebas puntuales: margen apoteómico K + rojo, H-, 10% N-, cN-, C-; talo K + rojo, H-, 10% N-, cN-, C. Sustrato y ecología: sobre madera, corteza, briófitas, rocas no calcáreas o calcáreas. Distribución mundial: todo el mundo. Notas: *Caloplaca citrina* se caracteriza por su color naranja, areolas planas completamente soledias o no alojadas con soralia marginal.

***Candelina submexicana* (B. de Lesd.) Poelt**



Talo: forma rosetas, de 2-4 cm de ancho, lóbulos periféricos: plano a convexo y a veces plegado. Superficie superior de 6 mm de largo y 0.3-1.5 mm de ancho: amarillo brillante a amarillo dorado o rojo anaranjado, corteza lisa a algo rugosa, a veces un tanto brillante. Corteza: 10-20 μ m de grosor de la médula: blanca, con gránulos. Corteza inferior: 20- 30 μ m de grosor debajo de las puntas de los lóbulos, pero centralmente o ausente en toda la superficie inferior: amarillo periférico pero con pálido central; hapters: a veces presente, Apotecio: común, sésil a substipitar, hasta 1.5 mm de ancho; margen: suave, llegando a ser crenulado con la edad; disco: amarillo más oscuro que el talo, a veces con un tinte verdoso; epithecium: 5 micro metros de espesor; himenio: 45-55 micro metros de alto; parafises: puntas simples, cilíndricas o algo hinchadas, de hasta 4 micro metros de ancho; hipotecium: 60-70 micro metros de espesor, ascosporas: elipsoide estrechamente a débilmente en forma de riñón, 11-15 x 4-5 micro metros picnidios: frecuente, globular a elipsoide ampliamente, sumergido o apareciendo como verrugas elevadas en la superficie del talo conidios: estrechamente elipsoide, 2-3 x 1.5 micro metros. Pruebas puntuales: superficie superior K + rojizo C- KC- P-; médula K + rojiza, C-, KC-, P-. Metabolito secundario: calicina. Sustrato y ecología: rocas y cantos rodados libres de calcio en hábitats abiertos. Distribución mundial: México central al suroeste de Estados Unidos.

***Lecidea* sp.**



Liquen costroso con negro o marrón oscuro en la superficie, apotecios raramente coloreados en los márgenes, la mayoría son negros. Talo gris, café o naranja rústico causado por el sustrato. Pruebas puntuales: En la médula IKI- o IKI+ azul; producido por la variedad de componentes incluidos los nórdicos. Sustrato y ecología: Estrictamente en rocas ácidas.

Género *Xanthoparmelia*

El género *Xanthoparmelia* pertenece a la familia Lecanorales y presenta un talo folioso, verde amarillento, lóbulos pequeños a medianos; superficie inferior con rizinas abundantes. Isidios frecuentes. Apotecios lecanorinos, con disco pardo. Tiene una distribución cosmopolita y prefiere ambientes de vegetación húmeda a seca de elevaciones medianas a altas (Barreno Rodríguez y Pérez-Ortega, 2003a).

El género más abundante en la REPSA es *Xanthoparmelia*; según Brodo (2001), son líquenes foliáceos de tamaño pequeño a mediano, de color verde amarillento (ácido úsnico), líquenes foliosos, estrechamente unidos al sustrato o algunas especies, se encuentran en el suelo; lóbulos mayormente 0.5-4 µm de ancho; a menudo con isidios, ya sea cilíndricos (de diámetro más o menos uniforme) o globosos, contraídos en la base y frecuentemente abiertos; raramente con soledios; con una superficie inferior de color marrón pálido a negro ébano; rizinas no ramificadas o bifurcadas, generalmente abundantes, pero carentes en algunas especies. Fotobionte verde (*Trebouxia*). Apotecios abundantes en algunas especies, lecanorina, con anchos discos y márgenes de talo color marrón; esporas incoloras, elipsoides, 6-13 x 4-8 µm, 8 por asco; picnidios laminares comunes, inmersos en el talo, visibles como manchas negras; conidios mayormente 5-8 µm

de largo, baciliformes o con protuberancias en las puntas a lo largo de la longitud. Química: Córtex K-, KC + amarillo (ácido úsnico); médula que contiene una amplia variedad de sustancias de líquenes, especialmente depsidonas de β -orcinol tales como ácidos salazínicos, estictico y noresticticos. Hábitat: Crecen en las rocas, especialmente silíceas, no calcáreas y en suelos minerales; la mayoría de las especies en sitios abiertos, relativamente secos, aunque algunas especies pueden tolerar el sustrato y prosperar en las rocas del bosque; muy raramente, en madera dura y desgastada. Las características más importantes para nombrar las especies de *Xanthoparmelia* son el grado de adaptación al sustrato, el color de la superficie inferior, la presencia de isidios de diferentes tipos y la química. Debido a que algunas diferencias químicas importantes no son reveladas por la prueba de manchas solamente, algunos análisis químicos adicionales a menudo son necesarios para hacer una identificación positiva (Brodo et al., 2001).

***Xanthoparmelia coloradoensis* (Gyeln) Hale**



Sustrato: roca silícea, silicífera, roca ácida, piedras, guijarros, sin especificar. Hábito de vida: liquenizado (mutualista con fotobiontes de algas). Talo folioso, similar a una hoja; superficie superior: amarillo verde amarillo verdoso; [superficie superior]: epruinosa; [estructura marginal de

la superficie superior y marginal]: ausente; subestructuras de morfol (por ejemplo, areoles, lóbulos, ramas) ancho [mm]: (bajo) 1.5 (alto) 3.0; subestructuras de morfol (por ejemplo, areoles, squamules): distante no contiguo; subestructuras de morfol (por ejemplo, areoles, lóbulos, ramas) superficie superior: lisa, plano superficie inferior: marrón (si está pálida: leonado, marrón claro, si está medio: canela); [estructura inferior] estructuras específicas: presente; [superficie inferior] riznas, estructuras rizoides: presente; [rizal inferior] rizonas, estructuras rizinoides: no ramificadas, simples. Ascomas: presente: apotecial, apotecioide - himenial; ascoma [mm]: (bajo) 3.0 (alto) 15.0; disco: plano, aplanado, expandido: marrón (si está pálido: leonado, canela, si está medio: canela); superficie del margen; área periostiolar, ostiole, involucrellum: amarillo verde. Ascosporas: (mediana) 8.0; forma: elipsoidal; longitud [μm]: (bajo) 7.0 (alto) 9.0; ancho [μm]: (bajo) 4.0 (alto) 5.0; septa: ausente luz de la espora unilocular, monolocular; pigmentación: hialina, incolora; Conidios: bitiforme; longitud [μm]: (bajo) 4.0 (alto) 6.0. Metabolitos secundarios: presente, ácido consalazínico; ácido norstictico; ácido protocetrárico; ácido salazínico; ácido úrico.

***Xanthoparmelia conspersa* (Ach.) Hale**



Talo estrechamente o pobremente unido a la roca, algo brillante, comúnmente bronceado en los márgenes; lóbulos bastante estrechos, de 1-3 mm de ancho, abarrotados y a menudo superpuestos, con isidios cilíndricos dispersos a lobulados o ramificados en la superficie, a veces también desarrollando lóbulos abundantes en el centro del talo; superficie inferior de tono negro, excepto por un área de color marrón pálido a marrón oscuro cerca de las puntas del globo. Apotecio raro, con márgenes de isidios. Hábitat: Creen en las rocas silíceas, especialmente granate, en lugares soleados. Química: Medula PD + rojo-anaranjado, K + amarillo o rojo, KC-, C- (complejo de ácido estíctico incluyendo ácido criptoestíctico, con cantidades variables de ácido norestíctico). Esta es la especie más común de isidios que contiene estíctico y (o) ácido estíctico y tiene una superficie inferior negra (Brodo *et al.*, 2001) (Figura 5a y 5b del texto).

***Xanthoparmelia incerta* (Kurak y Filson) Elix y J. Johnst**



Talo: folioso, estrechamente anidado 3-8 cm de diámetro, lóbulos irregulares: subirregular, alargado, plano a subconvexo, 1-2.5 mm de ancho, ápices: liso a crenado, superficie superior: verde amarillento, liso pero se vuelve rugoso con la edad, opaco, sin soralia, isidios o médula: blanco, con capa de algas continua, superficie inferior: negro, plano, escasamente rizinato; rizomas: café oscuro a negro, simple, grueso, 0.2-0.4 mm de largo. Apotecios: común, 2-8 mm de ancho, laminar en el talo; disco: marrón canela a marrón oscuro; margen: liso: ascosporas: esporas: hialina, simple, elipsoide, 7-11 x 5-7 μm . Pycnidia: conidios comunes: bifusiformes, 6-7 x 1 μm . Pruebas puntuales: corteza superior K, C-, KC- , PAG-; médula K + amarilla tornándose roja oscura, C-, KC-, P + roja. Metabolitos secundarios: corteza superior con ácido úsnico (mayor); médula con ácido salazínico (mayor) y ácido consalazínico (menor) y a menudo con ácidos norstíctico y protocetrárico (ambos trazas). Sustrato y ecología: en rocas ácidas, a menudo en hábitats abiertos o parcialmente sombreados. Distribución mundial: Australia, África meridional y América del Norte y del Sur. Nota: *Xanthoparmelia incerta* es relativamente poco común en América.

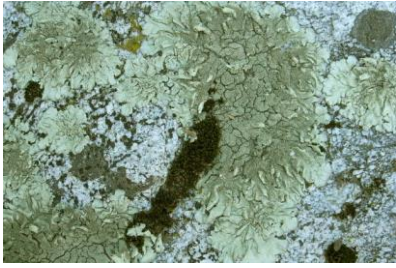
***Xanthoparmelia lineola* (E.C. Berru) Hale**



Talo: folioso, 4-20 cm diámetro, plano a subconvexo. Lobulos: irregulares: subirregular, alargado, plano a subconvexo separado y contiguo, 0.8-3 mm de ancho; ápices: liso a crenado, sin cilios. Superficie superior: amarillo-verde, liso, pero se vuelve rugoso con la edad, opaco a ligeramente

brillante, sin soralia. Isidios o médula: blanco con capa de algas continuas. Superficie inferior: marrón pálido a medio, plano. Apotecios: común, 2-5 mm, laminar en el talo, disco: canela-marrón a marrón oscuro. Ascosporas: esporas: hialina, simple, elipsoide, 9-12 x 6-7 μ m. Picnidios: comunes sumergidos. Rizinas: marrón 0.2-0.4 mm. Pruebas puntuales: corteza superior K-, C-, P-, amarillo – rojo oscuro; C-, P+ rojo. Sustrato y ecología: Rocas ácidas a menudo en hábitats abiertos o parcialmente cerrados. Distribución mundial: Australia, África meridional, América del Norte y del Sur.

***Xanthoparmelia mexicana* (Gylen) Hale**



Talo: folioso, 4- 10 cm de diámetro, plano a subconvexo. Lóbulos: irregulares: subirregular, alargado, plano a subconvexo. Ápices: liso a crenado, elipsoide. Superficie superior: amarillo-verde, liso brillante. Isidio: subgloboso a cilíndrico, ramificado 0.1 -0.2 mm de diámetro, marrón negruzco. Soredio: ausente. Médula: blanco, con capa de algas. Superficie inferior: marrón pálido a medio, plano. Apotecios: raro, 2-7 mm de ancho, laminar en el talo. Ascosporas: hialono, simple, elipsoide, 9-10 x 4-5 μm . Picnidio: poco frecuentes. Rizinas: marrón a marrón oscuro. Pruebas puntuales: corteza superior K-, P- amarillo a rojo oscuro, C-, P+ naranja. Sustrato y ecología: rocas ácidas, a menudo en el suelo y prefiere lugares abiertos y áridos. Distribución mundial: África, Asia, Australia, América del Norte y del Sur.

***Xanthoparmelia plitti* (Gyeln) Hale**



Talo: folioso, 4-10 cm de diámetro, superficie superior: amarillo – verde bordes lisos y brillantes. Isidio: abundante, globosos a cilíndricos. Soredios: blancos con capas de algas abundantes. Superficie inferior: marrón claro a oscuro. Apotecio: raro, 2-7 mm ancho. Rizinas: marrón claro. Pruebas puntuales: corteza superior: K-, P- C-; amarillo a naranja, C-, P+ naranja. Sustrato y ecología: rocas ácidas preferentemente lugares abiertos.

***Xanthoparmelia tinctina* (Maheu y Gillet) Hale**



Talo: folioso, 3-10 cm diámetro, plano a subconvexo. Lóbulos: plano a subconvexo. Superficie superior: amarillo- verde, periferia lisa a brillante. Isidio: abundante, estructuras globosas a barril inflado. Superficie inferior: negro con estructuras aplanadas. Isidios: abundantes, globosos a forma de barril inflado

irregular. Superficie inferior: negro a plano, moderadamente rizado. Apotecio: raro, 2-10 mm de ancho; color canela - marrón a marrón oscuro. Rizinas: negro 0.2- 0.6 mm de largo. Pruebas puntuales: corteza superior: K-, C-, P- amarillo que se convierte a rojo oscuro, C-, P+ rojo. Sustrato y ecología: sobre rocas ácidas, raramente sobre madera, generalmente se encuentra en hábitats abiertos. Áridos o semiáridos. Distribución mundial: Europa, norte de África y suroeste de América del Norte. Notas: Provisionalmente, Hale identificó el *Xanthoparmelia eisidiado* que contiene ácido salazínico de América del Norte con una superficie inferior negra como *X. tinctina*, pero en su monografía de 1990 restringió esa especie a Europa y al norte de África basándose en parte en la observación de que rara vez es erupsiva.

Anexo 2. Frecuencia y suma total IPA de líquenes saxícolas encontrados en la Ciudad Universitaria; foliosos (verde) costrosos (naranja)

Sitio	Microambiente	<i>X. coladoensis</i>	<i>X. conspersa</i>	<i>X. incerta</i>	<i>X. lineola</i>	<i>X. mexicana</i>	<i>X. plittii</i>	<i>X. tictina</i>	<i>C. citrina</i>	<i>C. submexicana</i>	<i>Leicidea</i> sp.	IPA
Sendero Ecológico	Promontorio	1	3						1			5
	Promontorio	1	7		1				1			10
	Promontorio	2	1		1				1		1	6
	Pared	1	4		3				1			9
	Pared	1	4		1				1		1	8
	Pared	1	3		3				1		3	11
Zona núcleo Oriente	Pared	5	3	5					2			15
	Pared	2	7						1	1		11
	Pared	1	2	2					3	1		9
	Plano		6	3					4			13
	Plano		3	6					2	1		12
	Plano	1	2	2					1	2		8
Zona Núcleo Poniente	Plano		1		1	1	2	1	1	3	2	12
	Plano		3			1	4	5		1		14
	Plano		3		1	1	3	2	1		1	12
	Pared		8		2	1	1	1		1		14
	Pared		2		3	3	3	1	1	1		14
	Pared		2		3	2	2	3	1	1		14

Anexo 2 Continuación. Frecuencia y suma total IPA de líquenes saxícolas encontrados en la Ciudad Universitaria; foliosos (verde) costrosos (naranja)

Sitio	Microambiente	<i>X. coladoensis</i>	<i>X. conspersa</i>	<i>X. incerta</i>	<i>X. lineola</i>	<i>X. mexicana</i>	<i>X. plittii</i>	<i>X. tictina</i>	<i>C. citrina</i>	<i>C. submexicana</i>	<i>Leicidea</i> sp.	IPA
Pedregal Remanente No. 42	Pared		1				2					3
	Pared		1				1					2
	Pared		1				1					2
	Promontorio		1				2					3
	Promontorio		2				1					3
	Promontorio		4									4
Geopedregal	Pared	2	5				5		1		2	15
	Pared	4	5				2				3	14
	Pared	2	5				1		1			9
	Plano	3	3				3		2			11
	Plano	1	5				3		1			10
	Plano		4				1					5
Molotito FC	Promontorio		7		1		3		1			12
	Promontorio		3	3	4		2		2		1	15
	Promontorio		6	2	1		1		2		1	13
	Pared		4	1	2							7
	Pared		5	6	2		2		1			16
	Pared		5	1					2		4	12

Anexo 3. Concentración en mg/Kg de contaminantes atmosféricos totales en las muestras analizadas en el equipo ICP-OES contenido en los tejidos de la especie *Xanthoparmelia conspersa* por sitio de estudio.

	Límite de detección en la muestra (mg/Kg)	Zona Núcleo Oriente	Zona Núcleo Poniente	Senda Ecológica	Pedregal remanente no. 42	Molotito	Geopedregal
Al	0.230	1845.82	2535.45	1101.98	1557.57	1492.63	2402.20
As	0.079	1.47	1.88	1.00	1.42	1.47	1.31
Ba	0.021	19.32	23.17	14.35	20.46	20.34	27.64
Cd	0.016	1.48	2.01	1.17	1.41	1.50	1.98
Co	0.117	0.80	1.04	0.78	0.88	0.98	2.12
Cr	0.520	3.50	4.49	2.42	3.78	3.65	7.18
Cu	0.025	86.30	41.33	41.94	52.33	64.41	43.63
Fe	0.044	1886.71	2831.30	1480.73	1910.009	2169.39	3853.19
Li	0.868	1.09	1.10	0.59	1.021	0.96	1.48
Mn	0.589	25.66	36.77	24.80	38.30	37.24	53.74
Ni	0.014	7.28	5.61	5.70	5.32	5.174	11.310
P	0.012	36.60	34.62	24.71	24.52	48.14	26.74
Pb	0.009	555.02	540.87	687.70	565.76	496.25	757.05
Si	0.057	27.21	37.71	23.62	33.77	42.98	22.91
Sr	2.478	116.28	165.98	75.95	118.26	114.08	226.12
Ti	0.043	8.26	10.23	4.98	6.08	7.25	8.81
V	0.026	115.71	112.48	89.97	85.00	100.36	103.53
Zn	0.108	1231.62	1321.92	1307.37	1623.46	1349.35	1234.84

Anexo 4. Comparativo de medidas de calidad de aire en México y Estados Unidos por medio de la Environmental Protection Agency of United States (US-EPA).

En Estados Unidos, la Environmental Protection Agency (EPA) creó el Índice de Calidad del Aire (AQI) Air Quality Index por sus siglas en inglés, donde se informa a la sociedad la calidad del aire diario y se centra en los efectos sobre la salud que pueden experimentarse en unas horas o días después de respirar aire contaminado. La EPA estableció normas nacionales de calidad de aire para proteger la salud pública (US-EPA, 2016) aunque sólo se calcula el AQI para cinco contaminantes principales regulados por la Ley de Aire Limpio: ozono a nivel del suelo, material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno.

Las emisiones de algunos contaminantes a la atmósfera de forma directa por automóviles, camiones y otros vehículos con motor se encuentran en concentraciones elevadas cerca de las carreteras principales. Algunos ejemplos de elementos contaminantes emitidos en forma directa incluyen material particulado (MP), monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y benceno, aunque hay cientos de elementos químicos emitidos por los vehículos motorizados. Los vehículos motorizados también emiten compuestos que provocan la formación de otros elementos contaminantes en la atmósfera, como el dióxido de nitrógeno, que se encuentra en concentraciones elevadas cerca de las carreteras principales y el ozono, que se forma aún más a favor de la dirección del viento. Más allá de las emisiones de escape de los vehículos y de evaporación, el tráfico de las carreteras también emite partículas derivadas de los frenos y los neumáticos que pueden trasladarse de la carretera al aire. Ya sea en forma individual o en combinación, muchos de los elementos contaminantes que están cerca de las carreteras están asociados con efectos adversos para la salud (US-EPA, 2015). Por lo general, los niveles más altos están en los primeros 150 metros de una carretera y alcanzan niveles de fondo dentro de aproximadamente 600 metros de una carretera, dependiendo del elemento contaminante, la hora del día y el terreno cercano.

Muchos estudios científicos han encontrado que las personas que viven, trabajan o asisten a una escuela cerca de carreteras principales parecen tener un mayor riesgo a padecer una variedad de efectos sobre la salud a corto y largo plazo, incluyendo el asma, la disminución de la función pulmonar, dificultad en el desarrollo pulmonar en los niños y consecuencias cardiovasculares en los adultos (US-EPA, 2015). La OMS presentó una guía sobre los límites máximos permisibles de los contaminantes relativos al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.

Límites máximos permisibles según la OMS en la Guía de la Calidad del Aire (OMS, 2005).

Contaminante	Límite máximo permisible
Material particulado	MP _{2.5} : 10 µg/m ³ , media anual 25 µg/m ³ , media de 24 horas MP ₁₀ : 20 µg/m ³ , media anual 50 µg/m ³ , media de 24 horas
Ozono	100 µg/m ³ , media de ocho horas
Dióxido de nitrógeno	40 µg/m ³ , media anual 200 µg/m ³ media de una hora
Dióxido de azufre	20 µg/m ³ , media de 24 horas 500 µg/m ³ , media de 10 minutos

Debido a esta preocupación por los principales contaminantes que son dañinos para la salud, el gobierno de la Ciudad de México estableció los parámetros de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que describen los límites permisibles para los contaminantes criterio, que son de observación obligatoria y están condicionados a estar bajo revisión periódica para tener información actualizada de los efectos en la salud y gestión de la calidad del aire.

La CDMX tiene el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) que se encuentra formada por cuatro subsistemas, los cuales son RAMA, REDMA, REDMET y

REDDA donde realizan análisis de laboratorio fisicoquímico de muestras para posteriormente procesar y difundir los datos. El objetivo del SIMAT es generar información para:

1. Evaluar el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental en la Ciudad de México y la zona conurbada.
2. Evaluar el estado de la calidad del aire con respecto a la concentración de los contaminantes criterio.
3. Cuantificar los niveles de exposición de la población a la contaminación del aire ambiente.
4. Informar y prevenir a la población de exposición de la población a la contaminación y sus posibles riesgos.
5. Proporcionar información inmediata para la activación de alertas o procedimientos de emergencia, derivados de una concentración de contaminantes asociada a actividades humanas y/o a fuentes naturales, que puedan representar un riesgo para la salud o el ambiente.
6. Informar de manera oportuna a la población sobre el estado que guarda la calidad del aire.
7. Generar información para la evaluación de la distribución espacial y el transporte de los contaminantes atmosféricos.
8. Generar datos confiables para la evaluación y seguimiento de las estrategias de gestión de la calidad del aire instrumentadas en la Ciudad de México y la zona conurbada.
9. Evaluar la tendencia histórica de los contaminantes criterio en la Ciudad de México y la zona conurbada.

Estos subsistemas son:

- Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) utiliza equipos continuos para la medición de dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono, PM₁₀ y PM_{2.5}. Está integrada por 29 estaciones de monitoreo y cuenta con un laboratorio para el mantenimiento y calibración de los equipos de monitoreo.

- Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA) es responsable de la recolección de muestras de partículas suspendidas para su análisis gravimétrico y la determinación de metales pesados, principalmente plomo. Está integrada por 11 sitios y utiliza equipos manuales para el muestreo que se realiza una vez cada seis días.
- Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) está integrada por 19 sitios con equipos continuos para la medición de las principales variables meteorológicas de superficie: temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, radiación solar y presión barométrica.
- Red de Depósito Atmosférico (REDDA) utiliza equipos semiautomáticos para la recolección de muestras de depósito seco (polvo sedimentable) y depósito húmedo como lluvia, granizo, nieve y rocío; existen 16 sitios de muestro Las muestras de depósito húmedo se realiza un análisis fisicoquímico para conocer las características físicas de la precipitación, composición iónica y acidez. El muestro se realiza una vez cada siete días.

La medición de los contaminantes del aire es una actividad técnica compleja que involucra el uso de equipo especializado, personal calificado para su operación y una infraestructura adecuada de soporte y comunicaciones. Además de la medición, es necesario asegurar que los datos generados describan de manera apropiada el estado de la calidad del aire, por ello, la operación del programa de monitoreo requiere también de metodologías y estándares para la medición, así como de un programa continuo de aseguramiento de la calidad (SEDEMA-Aire-CDMX, 2018). Las NOM vigentes en materia de salud que se monitorean son:

Contaminante	NOM	Publicación	Descripción
Dióxido de azufre (SO ₂)	NOM-022-SSA1-2010	8 de septiembre 2010	0.110 ppm, máximo promedio de 24 h 0.200 ppm, segundo máximo anual como promedio móvil de 8 h 0.025 ppm, promedio anual
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	23 de septiembre 1994	11.0 ppm, máximo anual como promedio móvil de 8 h
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	NOM-023-SSA1-1993	23 de septiembre 1994	0.210 ppm, promedio horario
Ozono (O ₃)	NOM-020-SSA1-2014	19 de agosto 2014	0.095 ppm, promedio horario 0.070 ppm, máximo anual del promedio móvil de 8 h
Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀)	NOM-025-SSA1-2014	20 de agosto 2014	75 µg/m ³ , promedio 24 h 40 µg/m ³ , promedio anual
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	NOM-025-SSA1-2014	20 de agosto 2014	45 µg/m ³ , promedio anual 12 µg/m ³ , promedio anual
Plomo (Pb)	NOM-026-SSA1-1993	23 de diciembre 1994	1.5 µg/m ³ , en un periodo de tres meses como promedio aritmético

Tomado de: Dirección de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (2017)
<http://www.aire.CdMx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=&dc=%27Yw==>

Para tener una visualización de la salud de un ecosistema, se utilizan especies que sean sensibles a dicha contaminación y se pueda medir, como es el caso de los líquenes, donde se aplica el índice de Pureza Atmosférica (IPA) donde su objetivo es tener aproximaciones para delimitar áreas isocontaminadas, que cuantifica la aparición de especies liquenáceas valorando su presencia en el sitio o lugar de estudio, así como su abundancia, hasta su fertilidad y desarrollo.

También se mide en la CDMX El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (**IMECA**) donde es utilizada como herramienta analítica desarrollada para informar sobre los niveles de contaminación de manera fácil y oportuna a la población, de tal forma que funcione como indicador de las medidas precautorias que debe tomar la población ante una contingencia atmosférica. El cálculo del IMECA implica transformar e integrar los datos de concentraciones de un grupo de contaminantes, conocidos como contaminantes criterio, en valores independientes de las unidades de los contaminantes considerados (valores adimensionales), mismos que, por construcción, indican los valores de las normas de calidad del aire para un contaminante determinado cuando el IMECA toma el valor de 100 puntos (SEMARNAT, 2018).

A continuación se presentan los valores normados para los contaminantes del aire en México:

Contaminante	Valores límite			Normas Oficiales Mexicanas
	Exposición aguda		Exposición crónica	
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	(Para protección de la salud de la población susceptible)	
Ozono (O3)	0.11 ppm (1 hora) (216 µg/m3)	Ninguna vez al año	-	Modificación a la NOM-020-SSA1-1993*
	0.08 ppm (8 horas)	Quinto máximo en un año		
Monóxido de carbono (CO)	11 ppm (8 horas) (12595 µg/m3)	1 vez al año	-	NOM-021-SSA1-1993**
Dióxido de azufre (SO2)	0.13 ppm (24 horas) (341 µg/m3)	1 vez al año	0.03 ppm (media aritmética anual)	NOM-022-SSA1-1993**
Dióxido de nitrógeno (NO2)	0.21 ppm (1 hora) (395 µg/m3)	1 vez al año	-	NOM-023-SSA1-1993**
Partículas con diámetro aerodinámico equivalente igual o menor a 10 micrómetros (PM10); Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM2.5)	120 µg/m3 promedio de 24 horas. 65 µg/m3 promedio de 24 horas.	1 vez al año	50 µg/m3 (media aritmética anual) 15 µg/m3 (promedio aritmético anual)	Modificación a la NOM-025-SSA1-1993**
* Diario Oficial de la Federación del 30 de octubre de 2002.				
** Diario Oficial de la Federación del 26 de septiembre de 2005.				

Tomado de: SEMARNAT (2018)

http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AIRE01_04&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pas=s=dgeia_mce

Cuando el IMECA de cualquier contaminante criterio rebasa los 100 puntos, significa que sus niveles son perjudiciales para la salud. En la siguiente tabla se muestra la concentración de contaminantes criterio y su exposición.

Correspondencia entre concentración de contaminante y valores IMECA							
IMECA	Calidad del Aire	PST	PM10	SO2	NO2	CO	O ₃
		(24hr) µg/m ³	(24hr) µg/m ³	(24hr) ppm	(1hr) ppm	(8hr) ppm	(1hr) ppm
0 -100	Satisfactoria	260	150	0.13	0.21	11	0.11
101 - 200	No satisfactoria	546	350	0.35	0.66	22	0.23
201 - 300	Mala	627	420	0.56	1.1	31	0.35
301 - 500	Muy Mala	1000	600	1.00	2.0	50	0.60

Fuente: SEMARNAP / INE / CENICA. **Primer informe sobre la calidad del aire en ciudades mexicanas 1996**, 1ª ed., México, INE, 1997.