



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO



CAMPUS GUANAJUATO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE MINAS, METALURGIA Y GEOLOGÍA

**LOS LÍQUENES SAXÍCOLAS COMO
BIOINDICADORES DE CONTAMINACIÓN
ATMOSFÉRICA EN LOS TÚNELES DE LA
CIUDAD DE GUANAJUATO (MÉXICO)**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTA:

ISA LÓPEZ MARTIN

GUANAJUATO, GTO; SEPTIEMBRE 2017

ÍNDICE	PÁG
AGRADECIMIENTOS.....	4
RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN.....	8
CAPÍTULO I. GENERALIDADES	
I.1. Antecedentes.....	10
I.2. Justificación.....	11
I.3. Objetivo General.....	11
CAPÍTULO II. EL USO DE LIQUENES COMO BIOINDICADORES O BIOACUMULADORES DE CONTAMINANTES	
II.1. Características generales.....	12
II.2. Antecedentes generales.....	13
CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	
III.1. Localización del área de estudio.....	17
III.2. Construcción de los túneles y su uso en la ciudad de Guanajuato.....	17
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA	
IV.1. Etapa de recolección y trasplante de líquenes saxícolas a los túneles de la ciudad de Guanajuato.....	21

IV.2. Método analítico por Espectrometría de Masas de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) y microscopio electrónico.....	23
IV.3. Etapa de Gabinete.....	25
CAPÍTULO V. RESULTADOS	
V.1. Recolección y trasplante.....	26
V.2. Análisis estadístico, concentración de metales y metales pesados en los líquenes.....	30
V.3. Biomonitorio de metales y metales pesados.....	32
CAPÍTULO VI. CONCLUSIÓN.....	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

AGRADECIMIENTOS

Al término de esta etapa de mi vida, quiero expresar un profundo agradecimiento a quienes con su ayuda, apoyo y comprensión me alentaron a lograr esta hermosa realidad.

A mis padres:

Antonio López Guerrero y Ma. Cristina Martín Ramírez, por darme el maravilloso regalo de la vida y por ser pilares fundamentales de la misma, ayudándome en todo lo que necesito, teniendo siempre su apoyo incondicional, les doy las gracias por todo el amor y paciencia que siempre me han brindado por cada consejo que he recibido además de la confianza que me han tenido que sin duda alguna me han servido como motivación para salir a adelante. Los quiero y los amo muchísimo!

A mis hermanos:

Luille, Aidi, Asli, Ricky y Tony porque su compañía, apoyo y consejos me han servido como parte motivacional para seguir adelante además de ser testigos de momentos difíciles que he pasado también son testigos de esta maravillosa meta alcanzada. Los quiero.

A Sergio Jonathan Puente Padilla:

Por ser más que un amigo, ahora eres parte importante en mi vida, te agradezco de todo corazón por brindarme tu amor incondicional, respeto y comprensión, por apoyarme para concluir este sueño. Tu compañía durante estos hermosos años de carrera fue uno de mis mejores regalos. Porque eres esa clase de personas que saben superar cualquier adversidad dando lo mejor de sí mismos y sin esperar nada a cambio. Te amo!

A mis profesores:

Por todo el apoyo, atención y orientación que siempre me han otorgado cuando más lo necesite para llegar a concluir esta meta. Porque gracias a su esfuerzo y dedicación aprendí valiosas lecciones para la vida profesional y experiencias que me llevo para toda la vida.

A la Ing. Elia Mónica Morales Zarate:

Por ser más que una profesora para mí, ha sido una amiga que me apoyo de manera incondicional y constante brindándome además de sus consejos su ayuda en momentos difíciles durante mi carrera profesional y a la cual le debo un gran cariño y respeto el cual me llevaré en el corazón. Muchas gracias por todo!

A la Doctora María de Jesús Puy Alquiza:

Directora de la tesis, por su gran ayuda y colaboración en cada momento de consulta y soporte en este trabajo de investigación la cual me ha guiado y orientado a lo largo de este proyecto y porque más que una asesora ha sido una amiga y consejera para mí.

A la Universidad de Guanajuato:

Por darme la oportunidad de ser parte de esta gran institución y haberme permitido culminar en ella tantos años de esfuerzo y dedicación.

Y sin duda alguna a ***Dios*** y al ***Universo*** por haberme permitido existir y conocer a cada una de las personas que estuvieron presentes a lo largo de mi vida y de mi carrera.

RESUMEN

La deposición de metales aerotransportados en los túneles urbanos de la ciudad de Guanajuato se monitoreó utilizando cinco líquenes saxícolas (*Xanthoparmelia mexicana* (Gyeln.) Hale, *Xanthoparmelia tasmanica* (Hook y Taylor) Hale, *Caloplaca aff. Brouardii* (B. de Lesd.) Zahlbr, *Caloplaca aff. Ludificans* Arup, y *Aspicilia sp.*), recogidos de la zona de reserva ecológica (Área Natural Protegida) "La Bufa". Estos líquenes saxícolas fueron trasplantados y utilizados como biomonitores en cinco túneles urbanos (Galereña, Minero, Santa Fe, Ponciano Aguilar y Tamazuca) y como indicadores de contaminación atmosférica en el centro de Guanajuato, durante los períodos de abril a octubre de 2015, para evaluar el grado de contaminación por metales pesados.

Se analizaron muestras de líquenes para determinar los contenidos potenciales de contaminantes en la región y el grado de deposición de metales en suspensión en el aire para los contenidos de Be, Co, Cu, Ni, Pb, Sn, Sb, Cr, Zn, V y Th. Para este tipo de estudio se utilizó Espectrometría de Masas de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS). Se observó que las concentraciones de estos metales se encontraban en un rango alto, con valores máximos de Zn ($64.55-124.47\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), Sn ($6.41-9.66\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) y Cu ($6.73-39.89\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) en el túnel de Tamazuca; Pb ($37.33-49.25\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) en el túnel de Santa Fe; Cr ($5.51-21.83\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) y Sb ($0.63-4.06\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) en el túnel de Ponciano Aguilar; Co ($2.60-9.87\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) en el túnel de Galereña; Ni ($2.69-7.60\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) en el túnel de Minero, estos resultados fueron reportados en muestras de líquenes de los túneles urbanos de la ciudad de Guanajuato.

La secuencia de selectividad (afinidad o facilidad que tienen los metales para adherirse o depositarse en los líquenes la cual depende de la resistencia del líquen ante ese contaminante) las cuales fueron: Zn>Pb>Cu>Cr>Co>Sn>Ni>Sb en los túneles urbanos de la ciudad de Guanajuato. El orden general de las concentraciones del contenido de metales pesados se observó para el túnel de Tamazuca>Túnel de Santa Fe>Túnel de Ponciano Aguilar>Túnel de Galereña>Túnel de Minero.

Las especies *Aspicilia sp* y *Xanthoparmelia* mostraron más tolerancia a la presencia de metales pesados y en consecuencia se observó la mayor acumulación de estos.

La concentración más alta de Co se encontró en los líquenes (*Aspicilia sp*, *Caloplaca aff. Brouardii (B. de Lesd.) Zahlbr* y *Caloplaca aff. Ludificans Arup*) y fue en los túneles de Santa Fe y Galereña. Para Zn y Pb, las concentraciones mayores se encontraron en la *Xanthoparmelia mexicana (Gyeln.) Hale*, *Xanthoparmelia tasmanica (Hook. F. & Taylor) Hale* y *Aspicilia sp*, en los túneles de Tamazuca, Santa Fe y Galereña esto se debe a las muchas emisiones vehiculares e industriales.

Los resultados descritos anteriormente se deben a que las concentraciones de cada metal varían de un túnel a otro debido a la cercanía de las fuentes emisoras de contaminantes. En este trabajo se utilizaron las mismas cinco especies de líquen en cada uno de los túneles. La sensibilidad de los líquenes al aire contaminado y su capacidad para acumular metales pesados y retenerlos durante un largo período en su tallo se han convertido en una herramienta beneficiosa en el biomonitorio de varios contaminantes de metales pesados.

INTRODUCCIÓN

Las actividades de combustión antropogénica y los procesos de refinación de los combustibles fósiles son las fuentes principales de metales pesados (MP) en el aire del medio ambiente (Conti y Cecchetti 2001). En los últimos años los MP han recibido una mayor atención en los estudios de contaminación atmosférica porque algunos de ellos son altamente carcinógenos y mutagénicos (Loppi et al., 1999). Los estudios del comportamiento de las concentraciones de MP en el ambiente son de primordial importancia para comprender su efecto sobre la calidad del aire. Diferentes bioindicadores se usan para monitorear la contaminación del aire, tales como musgos, líquenes, plantas vasculares, plantas leñosas, etc., (Adeniyi, 1996).

Varias investigaciones han establecido el papel de los líquenes como biomonitor de contaminantes inorgánicos y orgánicos debido a la actividad antropogénica, principalmente vehicular e industrial (Conti y Cecchetti, 2001; García et al., 2009). El uso de líquenes como bioindicadores potenciales para medir la calidad del aire ha sido reconocido desde hace décadas (Nieboer et al, 1978, Sawidis et al., 1995, Chettri et al., 1997a, Conti et al., 2001).

En la ciudad de Guanajuato, los líquenes no están siendo utilizados como biomonitorización de contaminantes; por lo tanto, el presente estudio es el primer intento de evaluar la calidad del aire en los túneles de ésta ciudad. En la ciudad de Guanajuato, se presta una atención especial y necesaria a los problemas de contaminación atmosférica, ya que en los últimos años se ha incrementado el tráfico vehicular y la población. La falta de una red

de monitoreo del aire en el Distrito Minero impide cuantitativamente conocer los niveles de contaminación atmosférica a los cuales se encuentra expuesta la población.

Los túneles o calles subterráneas fueron construidos en un principio para resolver el problema de las inundaciones que constantemente acechaban a la ciudad. Más tarde, debido al crecimiento de la población y el aumento del tráfico, comenzó a utilizarse para que la gente pudiera comunicarse fácil y rápidamente en toda la ciudad. Hoy en día, los túneles de la ciudad de Guanajuato son una red subterránea de carreteras que conectan las principales avenidas de la ciudad que permite el tráfico y el tránsito de personas que tienen acceso peatonal.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

La ciudad de Guanajuato es una Ciudad Patrimonio de la Humanidad y por excelencia uno de los destinos turísticos más visitados del país, lo cual la ha convertido en una ciudad con gran afluencia de visitantes lo que representa un incremento en el flujo vehicular que transita por la ciudad lo que propicia el aumento de emisiones de gases contaminantes por parte de los vehículos automotores generando la contaminación del aire de la ciudad y daños a la salud de la población. Debido a este fenómeno se ha monitoreado con anterioridad por el Cuerpo Académico de Geología en conjunto con el Cuerpo Académico de Química y Tecnología del Silicio en los años 2012 y 2013 en tema de calidad del aire a través de cinco especies de líquenes que crecen en el municipio utilizados como bioindicadores de contaminación atmosférica los cuales son capaces de fijar y acumular algunos de los gases contaminantes más importantes presentes en las principales vías de comunicación peatonal de la zona urbana. Las investigaciones realizadas previamente han arrojado una serie de datos que muestran que dichos líquenes concentran niveles altos de metales pesados (Ni, Co, Cu, Sb, Pb, Zn y V), (Puy-Alquiza, et al., 2013). En base a ello se pretende realizar un estudio de contaminación atmosférica a través de líquenes saxícolas como bioindicadores para conocer la calidad del aire en la ciudad de Guanajuato a través de una red de túneles antiguos que proporcionan el medio para el tráfico vehicular y en parte para el tráfico peatonal.

1.2. Justificación

La presente investigación se enfocará a estudiar las cinco especies de líquenes saxícolas y su utilidad como bioindicadores para la medición de la contaminación atmosférica en los túneles de la ciudad de Guanajuato, de esta manera el presente trabajo permitirá mostrar los niveles de contaminación por metales pesados a los que está expuesta la población que continuamente transita por estas vialidades además de permitir conocer los niveles de contaminación presentes en nuestro medio ambiente y los riesgos para la salud humana.

1.3. Objetivo General

Determinar y analizar los líquenes saxícolas como bioindicadores de contaminación atmosférica además de caracterizar la presencia de metales pesados en especies de líquen expuestas durante seis meses en la ciudad de Guanajuato y verificar la ocurrencia y tipos de metales pesados en los líquenes, para la evaluación de la contaminación atmosférica en los túneles de la ciudad.

CAPÍTULO II. EL USO DE LIQUENES COMO BIOINDICADORES O BIOACUMULADORES DE CONTAMINANTES

II.1. Características generales

Una de las técnicas más comunes utilizadas hoy en día para monitorear la calidad del aire son las que emplean a los seres vivos como bioindicadores, pues a través de ellos se logra determinar la calidad de los ambientes terrestres y como bioacumuladores, al medir cuantitativamente la concentración de una sustancia y uno de los más usados son desde hace tiempo los líquenes (Hawksworth et al., 2005).

En varios países del mundo se han realizado estudios que utilizan a los líquenes como bioindicadores para valorar el estado de contaminación del aire en un área específica, pues los líquenes responden con cambios en su estado biológico ante ciertos niveles de contaminantes (Bernasconi et al., 2000; Bedregal et al., 2005; Hawksworth et al., 2005; Aspiazu et al., 2007; Fuga et al., 2008; Lijteroff et al., 2009) y en otros, aún se continúan con estudios en ese campo (Tabla 1).

La razón por la que se utilizan líquenes en este tipo de estudios es porque los líquenes son hongos liquenizados - reino Fungique que pueden colonizar cualquier tipo de ambiente, desde altas montañas hasta los desiertos (Fuga et al., 2008) es por eso que por más de 140 años se han utilizado los líquenes como biomonitores de la contaminación atmosférica (Hawksworth et al., 2005).

De acuerdo a las líneas de investigación más frecuentes se pueden dividir en dos, de acuerdo con la metodología empleada: como bioindicadores (Hawksworth et al., 2005; Canseco et al., 2006; Aspiazu et al., 2007) y como bioacumuladores (Bedregal et al., 2005; Aspiazu et al., 2007; Fuga et al., 2008).

El método por bioindicador consiste en el mapeo o cartografía de todas las especies de líquenes presentes en un área específica que manifiestan síntomas particulares en respuesta a los cambios ambientales; en la práctica, lo que se mide son las respuestas indirectas a la emisión de contaminantes, que se manifiestan por la presencia o ausencia de las especies de líquenes, su número, la frecuencia de aparición, la cobertura y los síntomas de daños externos o internos, sin determinar el origen o tipo de contaminante. El método por bioacumulación está basado en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los líquenes cuando acumulan sustancias particulares dentro de sus tejidos, cuyas concentraciones se determinan mediante métodos químicos. Consiste en el muestreo individual de las especies liquénicas y la medición de los contaminantes acumulados en sus tallos (Hawksworth et al., 2005).

II.2. Antecedentes generales

Hoy en día en muchos países europeos y en Estados Unidos se utilizan líquenes para monitorizar los efectos causados por contaminación gaseosa y por metales, por lo que son conocidos hasta hoy como bioindicadores de ciertos contaminantes y de daños al medio ambiente.

Los líquenes han sido empleados en numerosos estudios como biomonitores que buscan conocer la calidad del ambiente de

la Tierra. Éstos han sido utilizados para determinar la calidad de la atmósfera, dado que reaccionan ante los cambios producidos por la lluvia ácida (Hawksworth et al., 2005; Lijteroff et al., 2009). La eutrofización por amonio (Hawksworth et al., 2005), la contaminación por metales pesados (Bernasconi et al., 2000; Bedregal et al., 2005; Aspiazu et al., 2007; Fuga et al.; 2008); los derrames de hidrocarburos, la contaminación por dióxido de azufre (Hawksworth et al., 2005; Lijteroff et al., 2009) además de material radiactivo, entre otros. También son utilizados para determinar los cambios climáticos: radiación ultravioleta (Hawksworth et al., 2005), y para conocer la continuidad ecológica: bosques deciduos (bosque que pierde totalmente su follaje durante una parte del año), bosques de coníferas, fuego y estabilidad de superficies (Hawksworth et al., 2005).

Gracias a este tipo de estudios son muchos los metales que se han estudiado en las células de los líquenes: aluminio (Al), arsénico (As), boro (B), cadmio (Cd), calcio (Ca), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), algunos líquenes de zonas frías, como los del Cerro de la Muerte en Costa Rica, que forman estructuras elevadas denominadas “de tipo arborescente” que pueden confundirse con plantas comunes. (Bernasconi et al., 2000; Bedregal et al., 2005; Aspiazu et al., 2007; Fuga et al., 2008).

También son útiles para determinar la actividad del fuego en un bosque, pues después de un incendio no se recupera con facilidad la composición de flora y comunidades líquénicas que existieron antes del incendio. La sucesión de recolonización de las especies de líquenes es un bioindicador de recuperación de los bosque incendiados (Hawksworth et al., 2005). Giordani por otro lado ha investigado la influencia significativa de predictores

climáticos y factores de perturbación en líquenes epífitos, donde llegó a la conclusión de que su distribución depende tanto del sustrato y del ambiente como de otros factores relacionados.

El mayor potencial de utilizar líquenes como bioindicadores en los trópicos, es en relación con las perturbaciones en los bosques. Se ha demostrado que ciertas especies no pueden dispersarse de un árbol a otro más allá de distancias críticas y por esto pueden utilizarse como indicadoras de la edad de un bosque. En Tailandia, la separación en el ámbito de familia de los líquenes es suficiente para indicar si un bosque ha sido afectado por el fuego (Hawksworth et al., 2005). En Tailandia, además, se estudiaron líquenes en árboles de gran altura y su presencia sobre el tronco es indicador de la antigüedad del bosque; también, la diversidad de especies sobre las hojas puede ayudar a determinar si selvas tropicales con presencia de árboles muy altos se encuentran en bosques primarios o secundarios (Hawksworth et al., 2005).

Quilhot y col. (1998) demostraron que los líquenes han desarrollado estrategias a nivel químico, a fin de minimizar los daños inducidos por el aumento de las radiaciones UV como consecuencia de la disminución de la capa de ozono de los últimos años, desarrollando una serie de compuestos fotoprotectores, los cuales podrían ser utilizados para estimar las cantidades de radiación UV. Heinrich y Remele (2002) describen los métodos utilizados para la monitorización de la acumulación de metales radiactivos por líquenes. Garty (2002) hace otro tanto con los métodos utilizados para el seguimiento de la contaminación causada por metales pesados, y Batic (2002) con la bioindicación de la alteración por dióxido de azufre.

Tabla 1. Resultados de estudios de contaminación de algunas partes del mundo que empelaron los líquenes como bioindicadores o bioacumuladores de contaminación atmosférica relacionadas al tráfico vehicular.

Investigador y año	Contaminante estudiado en los líquenes	Lugar de estudio	Fuente de emisión del contaminante	Resultados importantes	Valores observados
Lijteroff et al. 2009	SO ₂	San Luis y Juana Koslay, Argentina	Emitido por la combustión interna del tráfico vehicular	Hay mayor número de especies, Índice de Pureza Atmosférica (IPA) mayor; altos valores de riqueza, diversidad y equitatividad en el área no contaminada.	La ausencia casi total de líquenes en la ciudad de San Luis refleja la baja calidad del aire en el espacio urbano y la eficacia de los líquenes como bioindicadores de la contaminación aérea.
Fuga et al. 2008	Arsénico (As), bario (Ba), bromo (Br), calcio (Ca), cloro (Cl), cromo (Cr), cesio (Cs), cobalto (Co), potasio (K), hierro (Fe), lantano (La), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), sodio (Na), rubidio (Rb), antimonio (Sb), escandio (Sc), selenio (Se), uranio (U), cinc (Zn)	Región metropolitana, Sao Paulo, Brasil	2000 industrias y 7,84 millones de vehículos	La acumulación de elementos tóxicos en <i>Canoparmelia texana</i> pueden ser de utilidad para determinar el riesgo humano de mortalidad cardiopulmonar.	El nivel de contaminación en la zona de Sao Paulo, Región metropolitana, indicó que las concentraciones de elementos mostraron valores mayores alrededor de la Industria Petroquímica e Industria Metalúrgica y en zonas urbanas afectadas por emisiones vehiculares. La acumulación de elementos tóxicos en <i>C. texana</i> puede ser utilizada para determinar el riesgo humano de mortalidad cardiopulmonar debido a la exposición prolongada a los niveles ambientales de aire contaminado.
Aspiazu et al. 2007	Oxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, monóxido de carbono, metales pesados: titanio (Ti), vanadio (V), cromo (Cr), cobalto (Co), níquel (Ni), manganeso (Mn), cobre (Cu) y cinc (Zn)	Valle Metropolitano de México	30 000 industrias: químicas, siderúrgicas, fundiciones de hierro, textiles, minería, papel, plásticos, nutrición, asfalto, aceites, cemento, petroquímica y alrededor de tres millones de automóviles	En época seca la deposición de Ti, Mn, Cu y Zn es uniforme. En todos los lugares: su concentración en líquenes varía poco. En época lluviosa el Ti, V, Cr, Co y Ni mantienen una deposición constante.	Respecto a la presencia y concentración de los elementos analizados en la ciudad de México, se puede decir que ciertos elementos aparecen en altas concentraciones, sin embargo, en algunas zonas de la ciudad la concentración es generalmente más alta que en otras.
Canseco et al. 2006	Combustión vehicular	La Paz, Bolivia	Tráfico vehicular	En las áreas de alta intensidad vehicular más contaminadas, existe menor diversidad de líquenes; valores bajos de presencia y cobertura.	Los resultados muestran que en áreas de alta intensidad vehicular, consecuentemente más contaminadas, existe menor diversidad de líquenes, además de valores bajos de presencia y cobertura. Por otro lado, las áreas con menor contaminación registran mayor diversidad líquénica y valores mayores de cobertura y presencia.
Bedregal et al. 2005	Metales pesados: aluminio (Al), calcio (Ca), cloro (Cl), vanadio (V), magnesio (Mg), manganeso (Mn), sodio (Na), titanio (Ti), arsénico (As), bromo (Br), cadmio (Cd), cerio (Ce), cobalto (Co), cromo (Cr), cesio (Cs), Hierro (Fe), hafnio (Hf), mercurio (Hg), potasio (K), lantano (La), rubidio (Rb), antimonio (Sb), escandio (Sc), estaño (Sn), torio (Th), cinc (Zn)	Lima, Perú	Tráfico vehicular, minería, industrias: utensilios, envases, materiales de construcción y pinturas	Existe correlación significativa entre la presencia de Pb y Br de acuerdo con la actividad antropogénica del sitio estudiado.	La finalidad fue evaluar la contaminación en la ciudad de Lima, Perú, en la que se realizó un monitoreo ambiental utilizando los biomonitores: Líquen <i>Usnea</i> sp. y <i>Tillandsia capillaris</i> . Los resultados obtenidos mostraron contaminación significativa en algunas zonas de la ciudad, procedente de la actividad industrial y de las emisiones vehiculares.
Andrés et al. 2000	CO, SO ₂ , NO _x	Rosario, Argentina	Tráfico vehicular	Se observan bajas concentraciones de estos contaminantes en zonas suburbanas y altas concentraciones en zonas cercanas a la mayor actividad comercial. Las concentraciones de los contaminantes tienden a disminuir durante el fin de semana debido a la poca circulación de vehículos.	Los resultados reflejan la existencia de bajas concentraciones de estos contaminantes en zonas suburbanas y altas concentraciones en zonas cercanas al centro comercial, motivado por una mayor circulación de automotores en estas últimas. También muestra una tendencia creciente para los Oxidos de Nitrógeno en 1995 respecto a 1994, acompañado por un crecimiento en la cantidad de Monóxido de Carbono.
Bernasconi et al. 2000	Metales pesados: níquel (Ni), cromo (Cr), cobre (Cu), cadmio (Cd), cinc (Zn) y plomo (Pb)	Microcentro de San Luis, Argentina	Tráfico vehicular, abrasión de neumáticos e industrias	Se encuentran altas concentraciones de Zn en algunas zonas. La concentración de metales pesados en líquenes es diferente, debido a los cambios de humedad que ocurren en las cuatro estaciones del año.	Los resultados señalan que en la ciudad de San Luis la emisión de estos metales es extremadamente baja y pueden ser absorbidos por la atmósfera natural sin evidencia de disfunciones de cualquier tipo. Sin embargo, los nuevos focos de emisión pueden generarse, por ejemplo por las industrias que liberan estos elementos afectando a la ciudad al ir aumentando su producción o en el caso del aumento del tráfico.

CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

III.1. Localización del área de estudio

Para este proyecto fueron recolectadas de la reserva ecológica “La Bufa” la cual está ubicada al NE de la ciudad de Guanajuato (Figura 1), un total de 30 muestras de líquenes saxícolas. La ciudad de Guanajuato es una ciudad en el centro de México y es la capital del estado que lleva el mismo nombre. El origen y desarrollo económico de la ciudad resultaron del descubrimiento de distintos yacimientos minerales en las montañas circundantes. Se encuentra en un estrecho valle, que hace que las calles de la ciudad sean estrechas y sinuosas.

El área de la ciudad de Guanajuato está asentada sobre una cañada principal con una serie de cañadas secundarias por lo que es difícil la construcción de vialidades, y en este caso los túneles suelen ser una mejor opción. El tipo de roca en el que está asentada la ciudad es de tipo sedimentario conocido como conglomerado rojo de Guanajuato caracterizado por ser una roca confiable y con buenas características geomecánicas que facilitan la construcción de túneles estables.

III.2. Construcción de los túneles y su uso en la ciudad de Guanajuato

Guanajuato es una ciudad que se ha enfrentado a múltiples inundaciones, por tal motivo en 1883 se construyeron, túneles de drenaje (actualmente de uso urbano), posteriormente, debido al crecimiento constante de la población y el parque vehicular, se hizo necesario desahogar el tráfico por algún lugar y fueron estos

mismos túneles la solución al segundo problema que surgió con el paso del tiempo.

Los túneles de Guanajuato se dividen básicamente en tres categorías, los Túneles Hidráulicos o de desagüe (primeras obras en ser construidas), los Túneles Viales y los Túneles Turísticos. Los primeros túneles de desagüe se construyeron a principios del siglo XIX con equipos y herramientas bastante rudimentarios a diferencia de la actualidad en donde se utilizan equipos modernos, el primer túnel en construirse fue el túnel Porfirio Días o conocido comúnmente por los guanajuatenses como el túnel “El Cuajín” (túnel más viejo de todo el estado), con alrededor de siete metros de diámetro (obra a cargo del Ingeniero Ponciano Aguilar), este túnel se terminó de construir a principios del siglo XX después de una terrible inundación en el año de 1905.

Junto a el túnel “El Cuajín” se construyó un túnel pequeño llamado túnel San Jerónimo conocido también como el “El Pípila” (uno de los más pequeños), después continuaron con túneles de uso vial, como es el caso del túnel de los Ángeles, el Tamazuca, Minero, Galereña entre otros, entre los túneles más recientes esta “El Ponciano Aguilar” construido en 1996, y el último túnel en construirse y el más grande, es el túnel Diego Rivera.

El equipo fundamental para la construcción de un túnel es principalmente el equipo mecánico (mano de obra humana), equipo de perforación, jumbos electrohidráulicos o pistolas neumáticas y el uso de explosivo. El equipo de carga una vez que la roca se dinamita y cae ya quebrada es levantada con equipos como el rezagado de bajo perfil utilizado comúnmente en minería. En cuanto a la estabilización de los túneles, las técnicas son el uso de pernos

ancla para asegurar los techos y el concreto lanzado para un terminado lizo al túnel el cual aparte de mejorar la ventilación se tiene mayor estabilidad y seguridad en ellos, además del uso de marcos de acero en áreas falladas o donde la roca es relativamente débil. En cuanto a la calidad del aire y ventilación de los túneles está el de la entrada y salida del mismo, el uso de lumbreras (ventilación natural), construcción de pozos de diferente inclinación con salida a la superficie (respiraderos), y por otra parte la ventilación artificial a base de abanicos extractores de gran capacidad para mover el aire y sacar los contaminantes.

La mayor parte de los proyectos han sido realizados por ingenieros de minas egresados de la Facultad de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato y siendo Guanajuato una ciudad minera, se implementaron técnicas mineras en los túneles. Guanajuato cuenta con veintiún túneles construidos, alrededor de cinco a seis proyectos ejecutivos ya realizados y entre diez o doce anteproyectos para el futuro; por ello es considerada una ciudad única en el mundo en cuanto a su cantidad de túneles (Extensión Cultural, 2011).

Para la ciudad de Guanajuato la solución vial aportada por las calles subterráneas resulta visualmente atractiva no solo para los turistas sino también para los mismos guanajuatenses, sin embargo no está libre de inconvenientes (contaminación atmosférica y auditiva) ni de riesgo por la intensidad del uso social y vehicular de estos antiguos cauces hacia donde van a dar las aguas pluviales.

A sus 50 años de construcción, la falta de mantenimiento puede convertirse en un riesgo en caso de una avenida fuerte de agua y principalmente la causa de diversos problemas para salud

humana, desgraciadamente parte de estos túneles se encuentran oscurecidos por el humo de los vehículos de motor lo que indica la gran acumulación de contaminantes dentro de ellos, en cuanto al mantenimiento general de los túneles está dirigido principalmente a la seguridad de los peatones y vehículos que circulan por ellos principalmente: el control de filtraciones de agua y la emisión de contaminantes causados por el tráfico vehicular.

Para monitorear la calidad del aire en los túneles de ésta ciudad, se propuso llevar a cabo un estudio piloto donde se monitorean estos líquenes en áreas de alto nivel vehicular en este caso en los túneles: Galereña, Minero, Santa Fe, Ponciano Aguilar, Tamazuca (Figura 1).

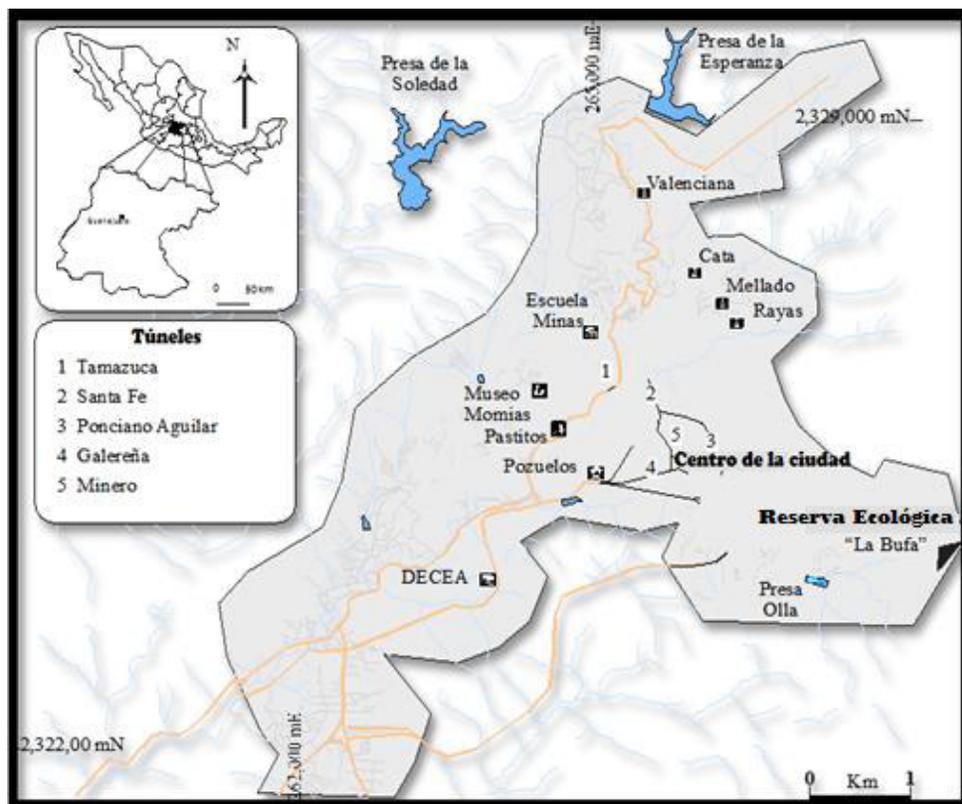


Figura 1. Ubicación del área de estudio

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

IV.1. Etapa de recolección y trasplante de líquenes saxícolas a los túneles de la ciudad de Guanajuato

Los pasos que se realizaron durante este proceso se llevaron a cabo de la siguiente manera:

Paso 1: Se realizó la identificación del área de estudio la cual fue un área de 5 km ubicada en las principales zonas de tránsito dentro de la ciudad de Guanajuato.

Paso 2: Se recolectaron 30 muestras en su totalidad de los cinco tipos de líquenes saxícolas de la reserva ecológica “La Bufa” (zona no contaminada) que se encuentran en la ciudad de Guanajuato.

Paso 3: Se identificó que las especies líquenes se tomaran de esta zona debido a que son las especies más comunes que crecen ahí, de las cuales dos especies son foliosas: *Xanthoparmelia mexicana* (Gyeln.) Hale y *Xanthoparmelia tasmanica* (Hook. & Taylor) Hale y tres costrosas: *Caloplaca aff. Brouardii* (B. de Lesd.) Zahlbr, *Caloplaca aff. Ludificans* Arup y *Aspicilia sp.*

Paso 4: Se observó que cada ejemplar no estuviese deteriorado o con presencia de algún tipo de daño, ya sea por el clima, el suelo o especies animales (en general la muestra debe tener un buen aspecto físico tanto en su follaje como en sus raíces).

Paso 5: Se identificó que el ejemplar estuviese aislado y no entremezclado con otro líquen o musgo para evitar alguna confusión. Una vez realizadas estas observaciones la muestra se extrajo de la tierra con especial cuidado de no estropearla (para poder trasladar las muestras a la zona de estudio fue necesario extraer parte del sustrato para evitar dañarlas).

Paso 6: Se empaclaron las muestras una vez extraídas en bolsas de plástico negro protegidas de la luz solar (aunque no es recomendable realizar el proceso de esta manera debido a que favorece la descomposición del material, por otro lado, para esta investigación se realizó de éste modo ya que el ambiente que tendrán es similar al que recibirán dentro de los túneles).

Paso 7: Se trasplantaron las muestras inmediatamente en los cinco túneles urbanos de la ciudad (Galereña, Minero, Santa Fe, Ponciano Aguilar, Tamazuca), en ellos se trasplantaron cinco muestras una de cada especie diferente de líquen (las muestras fueron colocadas de manera distribuida por todo el túnel de estudio). Las cinco muestras restantes fueron utilizadas para el análisis de muestras sin alteración.

Paso 8: Se dejaron las muestras expuestas durante seis meses en los periodos de abril a octubre de 2015.

Paso 9: Finalmente, se recogieron las muestras inmediatamente después de este periodo de tiempo en donde enseguida se limpiaron en seco.

IV.2. Método analítico por Espectrometría de Masas de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) y microscopio electrónico

A continuación en este proceso se describen los pasos que fueron realizados en continuación con los pasos anteriores:

Paso 1: Una vez limpias las muestras, se trituraron hasta un tamaño de 75μ (micras) para una mejor dilución.

Paso 2: Se diluyó 1g de muestra de líquen en ácido nítrico al 1% para formar una dilución para cada muestra de líquen (en este proceso, la muestra de líquen es casi totalmente diluida dejando únicamente algunos restos de materia orgánica y metales pesados que fueron adsorbidos por la muestra de líquen y los cuales se analizarán).

Paso 3: Ya obtenida la solución, es introducida en el equipo de Espectrometría de Masas de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), utilizando un instrumento de la Serie XII en el Centro de Geociencias-UNAM (Querétaro, México), la cual es pulverizada en argón y pasa a una antorcha que se calentó inductivamente a $10,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente (a esta temperatura el gas y casi todo el atomizado e ionizado formaron un plasma que proporciona una rica fuente de átomos tanto excitados como ionizados los cuales forman parte del elemento del cual se arrojaran los resultados que se mostraran más adelante), este paso se

realizó con cada una de las muestras de líquenes expuestas en los túneles de la ciudad.

Paso 4: Se hizo la preparación de las muestras que no fueron alteradas siguiendo los pasos del uno al tres para cada especie de liquen (“especímenes vírgenes”) y obtener de esta manera sus valores cero o iniciales al no estar expuestas a el área contaminada.

Paso 5: Se genera a continuación por medio del Espectrómetro de Masas de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) los resultados del análisis de contaminantes a través de gráficos correspondientes a cada elemento en el cual se obtienen datos para casi toda la tabla periódica con límites de detección inferiores a 0.1 µg/L para la mayoría de los elementos (los resultados son transmitidos en un ordenador conectado a el Espectrómetro, los cuales se muestran en el siguiente capítulo).

Paso 6: Por último, se realizó el análisis de las muestras a través de un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) con Detector de Energía Dispersiva (EDS) que permite recolectar los rayos X generados por la muestra y de este modo se realiza el análisis de la imagen de cada muestra.

Una vez generada la imagen el elemento encontrado (figura con forma extraña que se observa con bastante luz y con estructura extraña) es lo que es analizado, es decir, son los elementos en los que se presta especial atención, ya identificado el elemento se va aumentando la imagen a la que después se le da un punto que es el EDS (que es la imagen con un rectángulo en color rojo), este método (SEM)

es cualitativo lo cual nos dice que composición es ese elemento encontrado que estamos observando en la imagen puede ser zinc, plomo, cobre, etc., en este método no se indican los resultados encontrados en ese elemento (solo son formas y estructuras las cuales se van aumentando hasta lograr identificar o ver lo que nos ha llamado la atención.

IV.3. Etapa de Gabinete

Consistió en un análisis unidireccional e interpretación de datos obtenidos previamente de las etapas anteriores para realizar de esta manera el escrito final.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

V.1. Recolección y trasplante

En este estudio se aplicó el método de trasplante que consiste en exponer en un ambiente contaminado (túneles) líquenes junto a su sustrato una vez recolectados de su entorno natural y son colocados dentro de un área de control para su monitoreo.

La recolección de líquenes junto a su sustrato fue cuidadosamente seleccionada y colocada para su muestreo directamente en los túneles. Sólo el material con la mejor condición física fue trasplantado para cada uno de los túneles. Las muestras fueron empacadas en bolsas de plástico negro, protegidas de la luz solar e inmediatamente trasplantadas en los cinco túneles.

Las muestras de *Xanthoparmelia mexicana* (Gyeln.) Hale, *Xanthoparmelia tasmanica* (Hook. & Taylor) Hale, *Caloplaca aff. Brouardii* (B. de Lesd.) Zahlbr, *Caloplaca aff. Ludificans* Arup y *Aspicilia sp* (Figura 2), fueron seleccionadas debido a que eran los líquenes saxícolas más comunes en la zona y representaban formas de crecimiento folioso y crustoso, además de tolerar altas concentraciones de metales pesados, estas cinco especies fueron trasplantadas en cinco túneles (Galereña, Minero, Santa Fe, Ponciano Aguilar y Tamazuca) (Figura 3), dentro de la ciudad de Guanajuato, durante los períodos de abril a octubre de 2015 para el monitoreo activo de metales pesados tóxicos.

El área de estudio fue un área de 5 km ubicada en las principales zonas de tránsito donde las actividades antropogénicas están dentro de la ciudad de Guanajuato y en las que se

trasplantaron cinco muestras de cada especie diferente de líquen por cada uno de los túneles (los líquenes recogidos fueron expuestos durante 6 meses). La implementación de la estrategia de muestreo para la recolección de líquenes y la colocación de los trasplantes se basa en la intensidad del tráfico vehicular, la ubicación, la distribución de los túneles en la ciudad, la frecuencia con la que los peatones atraviesan por los túneles y la distancia de las minas, principal fuente de contaminación además de la vehicular (Figura 3).

Después del periodo de tiempo establecido, los líquenes trasplantados se recogieron, se limpiaron en seco y se prepararon en muestras representativas, las muestras de líquenes se trituraron previamente hasta un tamaño de 75μ (micras), posteriormente se determinaron las concentraciones de metales pesados y se evaluaron las concentraciones de contaminantes en las muestras de líquen: berilio (Be), vanadio (V), torio (Th), cromo (Cr), cobalto (Co), níquel (Ni), Zinc (Zn), estaño (Sn), antimonio (Sb) y plomo (Pb) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$.

En base al método de selectividad de los líquenes a los metales pesados por referencia se sabe que los líquenes han sido utilizados anteriormente por diferentes investigadores en todo el mundo como bioindicadores y/o bioacumuladores de contaminación ya sea atmosférica o de otro tipo, por lo cual, los líquenes fueron el material más apropiado e indicado para este tipo de investigación además de que estas especies de líquenes son los que se encuentran con mayor facilidad en la ciudad. Basándose en autores anteriores los líquenes han sido clasificados como foliosos o crustosos con la capacidad para retener metales pesados en sus

tallos, debido a estas características, es que estos autores así los recomiendan (considerado material estándar de referencia).

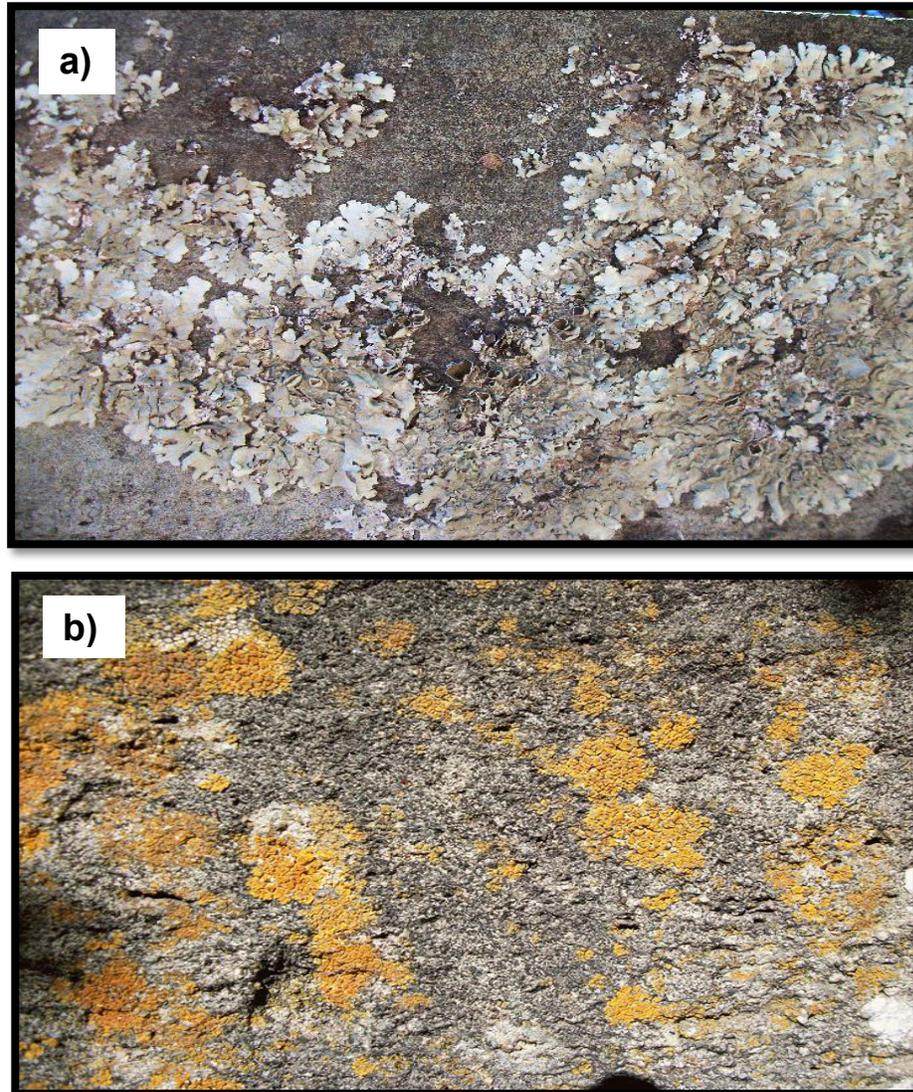


Figura 2. Fotografías de las especies de líquenes saxícolas recolectadas de la reserva ecológica “La Bufa” en la ciudad de Guanajuato; dos de tipo foliosa: a) *Xanthoparmelia mexicana* (Gyeln.) Hale y *Xanthoparmelia tasmanica* (Hook. & Taylor) Hale, y tres costrosas: b) *Caloplaca* aff. *Brouardii* (B.deLesd.) Zahlbr, *Caloplaca* aff. *Ludificans* Arup y *Aspicilia* sp.

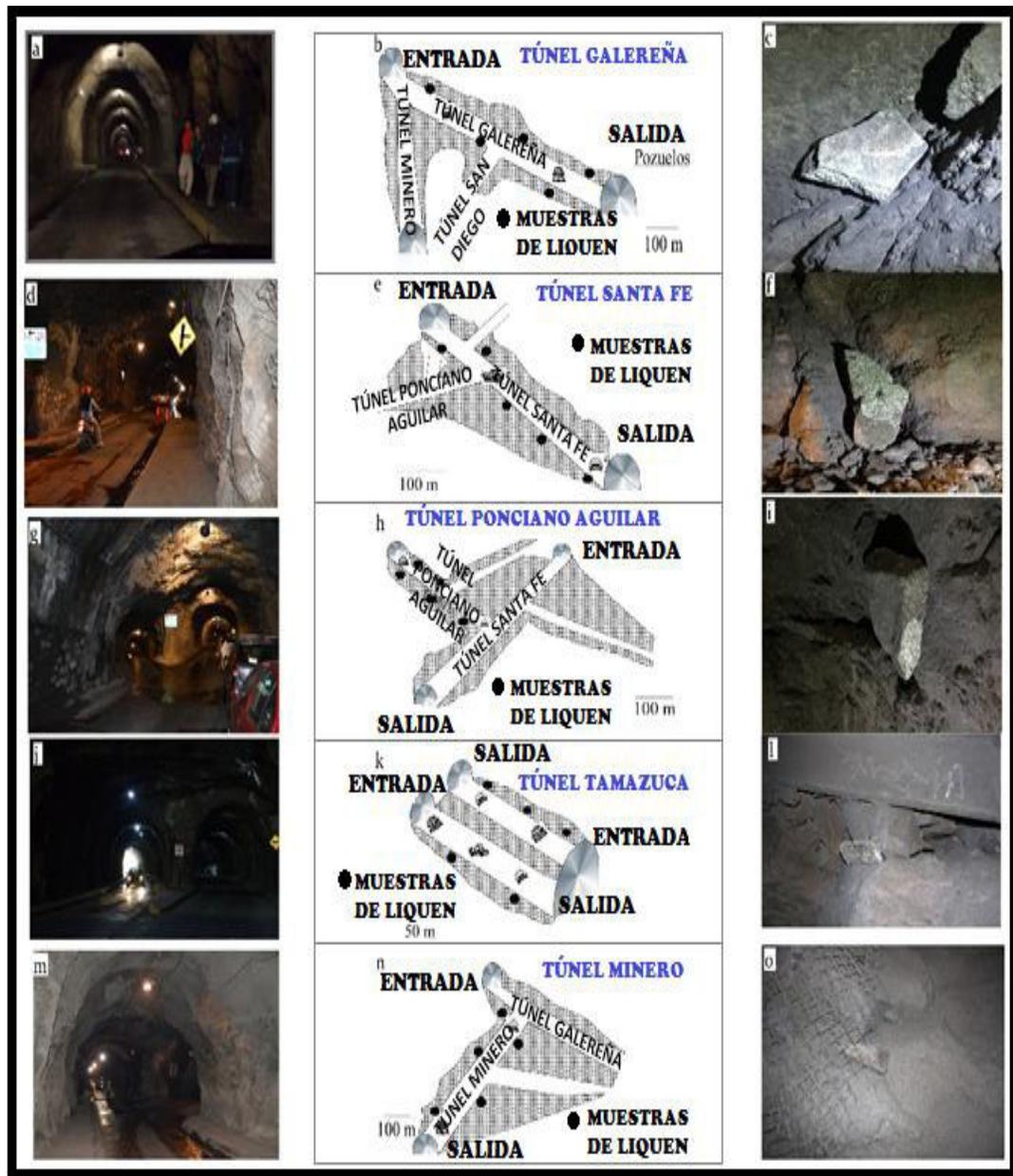


Figura 3. Ubicación del trasplante de líquenes dentro de los túneles

V.2. Análisis estadístico, concentración de metales y metales pesados en los líquenes

El análisis estadístico en las concentraciones de los elementos en las muestras de líquen mostró generalmente una distribución logarítmica normal. También se realizaron análisis de correlación en los datos analíticos para evaluar la relación entre los contaminantes y las posibles fuentes de contaminantes. Las correlaciones entre los elementos se probaron mediante la prueba de correlación de Pearson ($p < 0.01$).

Los resultados obtenidos en el análisis de los líquenes de la ciudad de Guanajuato se presentan en las Tablas 2, 3, 4 y 5. Las tablas muestran la media, la desviación estándar y el coeficiente de correlación para cada uno de los once metales analizados en los tallos del líquen, 0.01% entre los sitios, así como los metales.

En la Tabla 2 y Tabla 3 se indica el análisis de contaminantes que se realizó mediante Espectrometría de Masas de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), en la Tabla 2 se indican los resultados de la cantidad de metales pesados contenidos inicialmente en los líquenes colectados de la reserva ecológica “La Bufa” antes de ser trasplantados en los túneles. La Tabla 3 muestra el análisis de los metales pesados y en la Tabla 4 y 5 se muestra el análisis unidireccional de concentraciones medias, desviaciones estándar, mediana, mínimo, máximo y correlación.

Los resultados indican que todos los metales pesados son más altos en las áreas industriales y de gran tráfico vehicular que en relación a las áreas residenciales y de fondo, donde Zn, Cu, Co y los metales pesados totales caracterizan los sitios industriales, mientras que las áreas de alto tráfico están dominadas por

concentraciones elevadas de Pb, y Cr. En este estudio, los metales pesados encontrados son el Be, Ni, Cu, Co, Sn, Sb, Zn, Pb, V, Cr y Th.

La Tabla 3 y la Figura 4 muestran que los túneles de Santa Fe, Galereña y Tamazuca, tienen una mayor actividad de tráfico pesado. Entre los metales individuales, la concentración de plomo, zinc y vanadio es la más alta en muestras de túneles de Santa Fe, Ponciano Aguilar, Galereña, Minero y Tamazuca, lo que se explica por su ubicación, ya que, en esta zona, las muestras están expuestas al escape vehicular, y en base a estas dos tablas, casi todas las concentraciones de metales pesados en los túneles de Tamazuca, Santa Fe, Minero y Galereña, dieron la mayor lectura en los líquenes *Xanthoparmelia mexicana* (Gyeln.) Hale, *Xanthoparmelia tasmanica* Hale, y *Aspicilia* sp.

Los resultados del análisis químico de las muestras de líquenes también fueron interpretados en base a la escala de naturalidad/alteración desarrollada para concentraciones de elementos (por ejemplo, Al, Ba, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, V, Zn) en líquenes foliosos epífita por Nimis y Bargagli (1999), (Tabla 6).

Esta escala de siete clases expresa los grados de desviación (alteración ambiental) de las condiciones de fondo (naturalidad) basadas en las distribuciones percentiles de las concentraciones de elementos en los líquenes (1: naturalidad muy alta, 2: naturalidad alta, 3: naturalidad media, 4: naturalidad baja/alteración, 5: alteración media, 6: alteración alta, 7: alteración muy alta) (Nimis et al., 2000).

Las escalas de naturalidad/alteración del medio ambiente, como las utilizadas en este estudio, pueden interpretar los datos

biológicos de una manera que sea a la vez rigurosa y fácil de usar, proporcionando así información importante a aquellos que trabajan en la monitorización instrumental de la contaminación atmosférica: áreas de riesgo y optimización en la colocación de instrumentos (Nimis et al., 2000).

V.3. Biomonitorio de metales y metales pesados

El perfil de metales pesados en los cinco sitios muestra claramente que la variación en la concentración de éstos, que está relacionada con las emisiones vehiculares e industriales (Figura 5 y Tabla 7). Según Pirintsos et al. (2006), mayores niveles de Cu, Zn, Pb, Ni y Cr, indicaron vehículos automotores como los originadores.

Se muestran en las Figuras 5, 6 y 7 las caracterizaciones por SEM. En las imágenes se observan los elementos que fueron encontrados en los líquenes los cuales son interpretados en un diagrama en forma de picos. Este tipo de caracterización (imagen) muestra la forma de la partícula del mineral de cierto elemento que fue adsorbido y encontrado con mayor abundancia en el liquen (en cuanto a los resultados de SEM son cuantitativos debido a que la fase mineralógica de la que está compuesto un mineral es imposible encontrarse en los líquenes ya que solo se encuentran las partículas, por lo tanto no es posible hacer una descripción de éste).

El nivel de Cu, Zn, V, Pb, Th y Cr observado en este estudio mostró que son los elementos más abundantes acumulados en el tallo del liquen. La concentración registrada para elementos como Cr, Pb, Cu y Zn mostró que son contaminantes importantes en áreas de alto tráfico y también indicó el efecto de la emisión vehicular en la liberación de estos elementos en el ambiente circundante. Los elementos Ni, Cu, Co, Sb, Zn, Pb, Cr y V fueron

más altos en especies de *Xanthoparmelia* en el túnel de Tamazuca (Figura 6), y Be, Sn y Th en *Aspicilia sp.* Los elementos Cu, Sb y Pb fueron más altos en especies de *Xanthoparmelia* en el túnel de Santa Fe (Figura 7), Be, Ni, Zn, Cr y V en especies de *Caloplaca* y Co, Sn y Th en *Aspicilia sp.* Los elementos Ni, Cu, Sb, Zn, Pb y Cr fueron más altos en especies de *Xanthoparmelia* en el túnel de Ponciano Aguilar (Figura 7), Be, Co, Sn y V en especies de *Caloplaca* y Th en *Aspicilia sp.* Los elementos Cu, Co, Sb y Pb fueron más altos en especies de *Xanthoparmelia* en el túnel de Minero, Be, Ni, Sn, Zn, Cr, V y Th en *Aspicilia sp.* Los elementos Ni, Cu, Sb, Zn, Cr y V fueron los más altos en *Xanthoparmelia* en el túnel de Galereña, Be, Co, Sn, Pb y Th en *Aspicilia sp.* En la Tabla 3 se muestra la variación en la concentración de metales (Be, Ni, Co, Cu, Zn, Cr, Sn, Sb, V, Th y Pb).

La secuencia de selectividad del metal analizado desde el túnel de Tamazuca es Zn> Cu> V> Pb> Cr> Sn> Ni> Th> Be> Sb> Co; Para el túnel de Santa Fe es Zn> Pb> V> Cr> Cu> Sn> Th> Ni> Be> Sb; Para el túnel de Ponciano Aguilar es Zn> V> Cu> Cr> Pb> Sn> Ni> Th> Be> Sb> Co; Para el túnel de Minero es Zn> V> Pb> Cr> Cu> Sn> Ni> Be> Th> Co> Sb y para el túnel de Galereña es Zn> Pb> V> Cr> Cu> Be> Sb. La mayor parte de los metales cancerígenos (V, Cr, Pb, Ni y Be) (Nrigu y Pacyana, 1988, Environmental Protection Agency (EPA), 1989) se encontraron en concentraciones más elevadas en los túneles de Tamazuca, Galereña, Ponciano Aguilar, Santa Fe y Minero. La concentración media de metales pesados fue mayor para Pb, V, Cr, Ni y Be con $44.57 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $28.03 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $14.38 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $5.69 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ y $5.03 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ para el túnel de Santa Fe, Galereña, Ponciano Aguilar, y Minero respectivamente. Los datos anteriores indican que las especies de

Aspicilia sp y *Xanthoparmelia* acumulaban cantidades mayores de metales que las especies de *Caloplaca*. El resultado muestra una correlación directa entre la concentración de metal en el ambiente y la actividad vehicular.

Existen muchos coeficientes de correlación altamente significativos entre metales y metales pesados en todos los sitios de muestreo (Tabla 5). En el túnel de Santa Fe, Be vs Co, Zn y Ni vs Cr ($r = 0.99, 0.99$ y 0.99 , respectivamente). Túnel de Galereña, V vs Cu, Zn y Cu frente a Cr ($r=0.99, 0.99$ y 0.99 , respectivamente). Túnel de Minero, Ni vs V, y Zn vs Cr, ($r=0.99$ y 0.98 respectivamente). Túnel de Ponciano Aguilar, Pb vs Cr, Ni y Sn vs Be ($r=0.99, 0.99$ y 0.99 respectivamente). Túnel de Tamazuca, V vs Cr, Co, Ni, Cu y Cr vs Co, Ni, Cu ($r=0.99, 0.99, 0.99, 0.99$ y $0.99, 0.99, 0.99$, respectivamente); Pb vs Sb (0.92).

Esto indica que estos sitios fueron influenciados por una fuente diferente de contaminación, muy probablemente la emisión vehicular y los neumáticos de los automóviles resultaron para Pb, Co, V y Zn, mientras que Ni, Cu, Be, Sb y Cr son componentes principales de la corrosión de piezas de automóviles. Las diferencias significativas registradas en las concentraciones elementales entre las áreas de exposición pueden enfatizar aún más la aceptación del organismo del líquen para monitorear los contaminantes de la atmósfera.

La Tabla 7 muestra una reseña de los límites de exposición y efectos sobre la salud que generan estos metales pesados lo que indica el riesgo potencial al que está expuesta la población de la ciudad de Guanajuato y los síntomas o padecimientos que pueden llegar a presentar.

Tabla 2. Composiciones químicas de muestras de líquenes y areniscas recolectadas del bosque prístino "La Bufa" en el Distrito Minero de Guanajuato.

El mayor y elementos traza	<i>Xanthoparmelia</i> a Especies	<i>Caloplaca</i> Especies	<i>Aspicilia sp.</i>	Liquen Medio
Na O (%) ²	0	0	0	0
Al O (%) ²	12.82	11.13	15.13	13.02
SiO (%) ²	32.42	54.28	38.13	41.61
K O (%) ²	13.52	5.68	5.03	8.07
MgO (%)	0	1.85	1.9	1.25
CaO (%)	27.9	5.88	8.2	13.99
Fe O (%) ^{2 3}	13.32	22.35	17.7	17.79
Be (µg g ⁻¹)	3.1021	3.10	14.84	7.01
Ni (µg g ⁻¹)	48.93	6.43	14.01	23.12
Cu (µg g ⁻¹)	21.71	18.09	17.89	19.23
Co (µg g ⁻¹)	7.00	3.93	4.64	5.19
Sn (µg g ⁻¹)	5.70	27.56	6.22	13.16
Sb (µg g ⁻¹)	1.44	1.68	1.31	1.48
Zn (µg g ⁻¹)	95.10	172.97	57.09	108.39
Pb (µg g ⁻¹)	21.40	26.42	20.06	22.63
Cr (µg g ⁻¹)	105.15	29.33	15.14	49.87
V (µg g ⁻¹)	58.40	53.51	56.25	56.05
Th (µg g ⁻¹)	5.16	13.13	5.19	7.83

Tabla 3. Acumulación de metales pesados ($\mu\text{g/g}^{-1}$) en líquenes saxícolas en los túneles del Distrito Minero de Guanajuato.

TÚNEL GALEREÑA	<i>Xanthoparmelia</i> Especies	<i>Caloplaca</i> Especies	<i>Aspicilia sp.</i>
Be	0.89	2.77	3.86
Ni	7.59	3.61	5.83
Cu	18.91	5.70	6.78
Co	2.60	2.29	9.87
Sn	2.34	6.29	7.16
Sb	2.25	1.10	0.98
Zn	70.53	38.17	48.21
Pb	23.10	11.65	48.18
Cr	19.83	11.58	11.13
V	35.28	23.06	25.76
Th	1.59	4.28	5.95

Tabla 3. Continuación

TÚNEL MINERO	<i>Xanthoparmelia</i> Especies	<i>Caloplaca</i> Especies	<i>Aspicilia sp.</i>
Be	3.37	5.07	6.66
Ni	5.16	2.69	7.60
Cu	9.59	6.36	8.35
Co	3.59	3.09	2.56
Sn	6.91	7.21	8.72
Sb	1.21	0.65	0.72
Zn	54.83	36.01	58.66
Pb	22.69	15.22	12.65
Cr	11.93	3.13	12.08
V	24.61	13.19	34.78
Th	4.97	5.98	6.00

Tabla 3. Continuación

TÚNEL SANTA FE	<i>Xanthoparmelia</i>	<i>Caloplaca</i>	<i>Aspicilia sp.</i>
	<i>Especies</i>	<i>Especies</i>	
Be	1.41	4.84	4.48
Ni	1.82	5.63	3.12
Cu	8.61	8.52	5.21
Co	0.44	6.04	6.20
Sn	2.33	7.47	8.49
Sb	2.02	0.99	0.91
Zn	44.31	51.60	51.02
Pb	49.25	37.33	47.13
Cr	5.16	15.59	8.39
V	11.07	28.33	20.38
Th	1.99	5.58	6.52

Tabla 3. Continuación

TÚNEL	<i>Xanthoparmelia</i>	<i>Caloplaca</i>	<i>Aspicilia sp.</i>
PONCIANO AGUILAR	<i>Especies</i>	<i>Especies</i>	
Be	1.57	4.30	3.94
Ni	7.03	6.36	3.69
Cu	29.29	8.68	9.12
Co	2.04	3.74	1.48
Sn	4.77	9.08	8.84
Sb	4.06	0.98	0.63
Zn	93.42	64.63	54.93
Pb	21.26	20.22	16.92
Cr	21.83	15.80	5.51
V	23.93	31.26	15.47
Th	3.13	5.29	6.38

Tabla 3. Continuación

TÚNEL TAMAZUCA	<i>Xanthoparmelia</i> Especies	<i>Caloplaca</i> Especies	<i>Aspicilia sp</i>
Be	2.47	4.43	4.49
Ni	7.32	2.33	4.67
Cu	39.89	6.73	17.28
Co	2.80	0.93	1.57
Sn	6.41	8.10	9.66
Sb	3.54	0.69	0.74
Zn	124.47	110.85	64.55
Pb	25.59	19.83	16.59
Cr	20.94	3.64	9.80
V	30.65	18.90	23.53
Th	4.01	5.92	7.26

Tabla 4. Resumen estadístico de las concentraciones de Metales Pesados ($\mu\text{g/g}^{-1}$) en líquenes recogidos en cinco túneles urbanos. DE, desviación estándar; Min, mínimo; Max, máximo; Med, mediana; N, número de muestras sobre los límites de detección. La media, las desviaciones estándar, los mínimos, máximos y medianas se calcularon utilizando cero para los valores límite de detección inferior.

Metales Pesados	TÚNEL GALEREÑA	Media	DE	Min	Max	Med	N
Be	7.54	2.51	1.50	0.89	3.86	2.77	6
Ni	17.04	5.68	1.99	3.61	7.59	5.83	6
Cu	31.41	10.47	7.33	5.70	18.91	6.78	6
Co	14.77	4.92	4.28	2.29	9.87	2.60	6
Sn	15.80	5.26	2.56	2.34	7.16	6.29	6
Sb	4.33	1.44	0.69	0.98	2.25	1.10	6
Zn	156.93	52.31	16.56	38.17	70.53	48.21	6
Pb	82.94	27.64	18.68	11.65	48.18	23.10	6
Cr	42.55	14.18	4.89	11.13	19.83	11.58	6
V	84.11	28.03	6.41	23.06	35.28	25.76	6
Th	11.83	3.94	2.20	1.59	5.95	4.28	6

Tabla 4. Continuación

<i>Metales Pesados</i>	<i>TÚNEL MINERO</i>	<i>Media</i>	<i>DE</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Med</i>	<i>N</i>
<i>Be</i>	15.10	5.03	1.64	3.37	6.66	5.07	6
<i>Ni</i>	15.46	5.15	2.45	2.69	7.60	5.16	6
<i>Cu</i>	24.30	8.10	1.62	6.36	9.59	8.35	6
<i>Co</i>	9.258	3.08	0.51	2.56	3.59	3.09	6
<i>Sn</i>	22.85	7.61	0.96	6.91	8.72	7.21	6
<i>Sb</i>	2.59	0.86	0.30	0.65	1.21	0.72	6
<i>Zn</i>	149.51	49.83	12.12	36.01	58.66	54.83	6
<i>Pb</i>	50.56	16.85	5.21	12.65	22.69	15.22	6
<i>Cr</i>	27.16	9.05	5.12	3.13	12.08	11.93	6
<i>V</i>	72.59	24.19	10.80	13.19	34.78	24.61	6
<i>Th</i>	16.96	5.65	0.58	4.97	6.00	5.98	6

Tabla 4. Continuación

<i>Metales Pesados</i>	<i>TÚNEL SANTA FE</i>	<i>Media</i>	<i>DE</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Med</i>	<i>N</i>
<i>Be</i>	10.73	3.57	1.88	1.41	4.84	4.48	6
<i>Ni</i>	10.58	3.52	1.93	1.82	5.63	3.12	6
<i>Cu</i>	22.35	7.45	1.93	5.21	8.61	8.52	6
<i>Co</i>	12.70	4.23	3.28	0.44	6.20	6.04	6
<i>Sn</i>	18.31	6.10	3.30	2.33	8.49	7.47	6
<i>Sb</i>	3.93	1.31	0.61	0.91	2.02	0.99	6
<i>Zn</i>	146.94	48.98	4.05	44.31	51.60	51.02	6
<i>Pb</i>	133.72	44.57	6.35	37.33	49.25	47.13	6
<i>Cr</i>	29.15	9.71	5.34	5.16	15.59	8.39	6
<i>V</i>	59.79	19.93	8.63	11.07	28.33	20.38	6
<i>Th</i>	14.10	4.70	2.39	1.99	6.52	5.58	6

Tabla 4. Continuación

<i>Metales Pesados</i>	<i>TÚNEL PONCIANO AGUILAR</i>	<i>Media</i>	<i>DE</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Med</i>	<i>N</i>
<i>Be</i>	9.82	3.27	1.48	1.57	4.30	3.94	6
<i>Ni</i>	17.09	5.69	1.76	3.69	7.03	6.36	6
<i>Cu</i>	47.09	15.69	11.77	8.68	29.29	9.12	6
<i>Co</i>	7.27	2.42	1.179	1.48	3.74	2.04	6
<i>Sn</i>	22.70	7.56	2.42	4.77	9.08	8.84	6
<i>Sb</i>	5.68	1.89	1.88	0.63	4.06	0.98	6
<i>Zn</i>	213.00	71.00	20.01	54.93	93.42	64.63	6
<i>Pb</i>	58.41	19.47	2.26	16.92	21.26	20.22	6
<i>Cr</i>	43.15	14.38	8.25	5.51	21.83	15.80	6
<i>V</i>	70.67	23.55	7.90	15.47	31.26	23.93	6
<i>Th</i>	14.81	4.93	1.65	3.13	6.38	5.29	6

Tabla 4. Continuación

<i>Metales Pesados</i>	<i>TÚNEL TAMAZUCA</i>	<i>Media</i>	<i>DE</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Med</i>	<i>N</i>
<i>Be</i>	11.40	3.80	1.14	2.47	4.49	4.43	6
<i>Ni</i>	14.32	4.77	2.49	2.33	7.32	4.67	6
<i>Cu</i>	63.92	21.30	16.94	6.73	39.89	17.28	6
<i>Co</i>	5.32	1.77	0.95	0.93	2.80	1.57	6
<i>Sn</i>	24.19	8.06	1.62	6.41	9.66	8.10	6
<i>Sb</i>	4.98	1.66	1.63	0.69	3.54	0.74	6
<i>Zn</i>	299.88	99.96	31.41	64.55	124.47	110.85	6
<i>Pb</i>	62.02	20.67	4.55	16.59	25.59	19.83	6
<i>Cr</i>	34.40	11.46	8.76	3.64	20.94	9.80	6
<i>V</i>	73.09	24.36	5.91	18.90	30.65	23.53	6
<i>Th</i>	17.20	5.73	1.63	4.01	7.26	5.92	6

Tabla 5. Valores del coeficiente de correlación (P<0.01) entre los túneles y las cantidades de metales pesados encontrados en los líquenes saxícolas.

<i>TUNEL GALERENA</i>	<i>Be</i>	<i>V</i>	<i>Cr</i>	<i>Co</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Sn</i>	<i>Sb</i>	<i>Pb</i>	<i>Th</i>
Be	1										
V	-0.83	1									
Cr	-0.94	0.96	1								
Co	0.75	-0.27	-0.50	1							
Ni	-0.57	0.92	0.80	0.10	1						
Cu	-0.90	0.99	0.99	-0.40	0.86	1					
Zn	-0.77	0.99	0.93	-0.17	0.96	0.97	1				
Sn	0.97	-0.92	-0.99	0.61	-0.72	-0.97	-0.88	1			
Sb	-0.96	0.95	0.99	-0.54	0.77	0.98	0.92	-0.99	1		
Pb	0.55	-0.00	-0.25	0.96	0.36	-0.13	0.09	0.37	-0.29	1	
Th	0.99	-0.82	-0.94	0.76	-0.55	-0.89	-0.76	0.97	-0.95	0.56	1

Tabla 5. Continuación

<i>TUNEL MINERO</i>	<i>Be</i>	<i>V</i>	<i>Cr</i>	<i>Co</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Sn</i>	<i>Sb</i>	<i>Pb</i>	<i>Th</i>
Be	1										
V	0.45	1									
Cr	-0.00	0.88	1								
Co	-0.99	-0.47	-0.02	1							
Ni	0.47	0.99	0.87	-0.50	1						
Cu	-0.40	0.63	0.91	0.37	0.61	1					
Zn	0.13	0.94	0.98	-0.16	0.93	0.85	1				
Sn	0.92	0.75	0.37	-0.93	0.77	-0.02	0.50	1			
Sb	-0.80	0.15	0.59	0.79	0.12	0.86	0.46	-0.52	1		
Pb	-0.96	-0.21	0.25	0.96	-0.24	0.61	0.11	-0.80	0.93	1	
Th	0.88	-0.02	-0.47	-0.86	0.00	-0.78	-0.34	0.63	-0.99	-0.97	1

Tabla 5. Continuación

TUNEL SANTA FE	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sn	Sb	Pb	Th
Be	1										
V	0.92	1									
Cr	0.79	0.96	1								
Co	0.99	0.87	0.72	1							
Ni	0.81	0.973	0.99	0.74	1						
Cu	-0.43	-0.07	0.18	-0.54	0.15	1					
Zn	0.99	0.91	0.78	0.99	0.80	-0.45	1				
Sn	0.96	0.80	0.62	0.99	0.65	-0.64	0.97	1			
Sb	-0.98	-0.85	-0.69	-0.99	-0.71	0.57	-0.99	-0.99	1		
Pb	-0.70	-0.92	-0.99	-0.61	-0.98	-0.32	-0.69	-0.51	0.58	1	
Th	0.95	0.78	0.59	0.98	0.61	-0.67	0.96	0.99	-0.99	-0.47	1

Tabla 5. Continuación

TUNEL PONCIANO AGUILAR	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sn	Sb	Pb	Th
Be	1										
V	0.07	1									
Cr	-0.70	0.65	1								
Co	0.39	0.94	0.38	1							
Ni	-0.56	0.78	0.98	0.54	1						
Cu	-0.99	0.02	0.76	-0.29	0.64	1					
Zn	-0.93	0.28	0.90	-0.03	0.81	0.96	1				
Sn	0.99	0.01	-0.74	0.32	-0.61	-0.99	-0.95	1			
Sb	-0.97	0.13	0.83	-0.18	0.72	0.99	0.98	-0.98	1		
Pb	-0.59	0.75	0.99	0.50	0.99	0.67	0.84	-0.64	0.75	1	
Th	0.89	-0.36	-0.94	-0.05	-0.86	-0.93	-0.99	0.92	-0.97	-0.88	1

Tabla 5. Continuación

TUNEL TAMAZUCA	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sn	Sb	Pb	Th
Be	1										
V	-0.90	1									
Cr	-0.92	0.99	1								
Co	-0.93	0.99	0.99	1							
Ni	-0.86	0.99	0.99	0.98	1						
Cu	-0.94	0.99	0.99	0.99	0.98	1					
Zn	-0.69	0.33	0.37	0.38	0.25	0.41	1				
Sn	0.89	-0.61	-0.65	-0.66	-0.54	-0.68	-0.94	1			
Sb	-0.99	0.92	0.94	0.94	0.88	0.95	0.66	-0.87	1		
Pb	-0.94	0.72	0.75	0.76	0.65	0.77	0.89	-0.99	0.92	1	
Th	0.92	-0.67	-0.70	-0.72	-0.61	-0.73	-0.91	0.99	-0.90	-0.99	1

Tabla 6. Tipos de situaciones ambientales en el área de encuesta. Escalas de naturalidad/alteración ambiental propuestas por Nimis y Bargagli (1999).

TÚNEL	Especie	Naturalidad/alteración	Especie	Naturalidad/alteración	Especie	Naturalidad/alteración
GALEREÑA	<i>Xanthoparmelia</i>		<i>Caloplaca</i>		<i>Aspicilia sp</i>	
Ni	7.59	Alter. alta	-----	-----	5.83	Alter. media
Cr	19.83	Alter. muy alta	11.58	Alter. alta	11.13	Alter. alta
V	35.28	Alter. muy alta	23.06	Alter. muy alta	25.76	Alter. muy alta

Tabla 6. Continuación

TÚNEL MINERO	Especie		Especie		Aspicilia sp	
	<i>Xanthoparmelia</i>	Naturalidad/alteración	<i>Caloplaca</i>	Naturalidad/alteración	Naturalidad/alteración	Naturalidad/alteración
Ni	5.16	Baja nat/alt.	-----	-----	7.60	Alter. alta
Cr	11.93	Alter. media	-----	-----	12.08	Alter. media
V	24.61	Alter. muy alta	13.19	Alter. muy alta	34.78	Alter. muy alta

Tabla 6. Continuación

TÚNEL SANTA FE	Especie		Especie		Aspicilia sp	
	<i>Xanthoparmelia</i>	Naturalidad/alteración	<i>Caloplaca</i>	Naturalidad/alteración	Naturalidad/alteración	Naturalidad/alteración
Ni	-----	-----	5.63	Alter. Media	-----	-----
Cr	5.16	Baja nat/alt	15.59	Alter. alta	8.39	Alter. Media
V	11.07	Muy alta alter.	28.33	Alter. muy alta	20.38	Alter. muy alta

Tabla 6. Continuación

TÚNEL PONCIANO AGUILAR	Especie		Especie		Aspicilia sp	
	<i>Xanthoparmelia</i>	Naturalidad/alteración	<i>Caloplaca</i>	Naturalidad/alteración	Naturalidad/alteración	Naturalidad/alteración
Ni	7.32	Alter. alta	-----	-----	-----	-----
Cr	21.83	Alter. muy alta	15.80	Alter. alta	-----	-----
V	23.93	Alter. muy alta	31.26	Alter. muy alta	15.47	Alter. Muy alta

Tabla 6. Continuación

TÚNEL TAMAZUCA	Especie		Especie		Aspicilia sp	
	<i>Xanthoparmelia</i>	Naturalidad/alteración	<i>Caloplaca</i>	Naturalidad/alteración	Naturalidad/alteración	Naturalidad/alteración
Ni	7.32	Alter. alta	-----	-----	-----	-----
Cu	39.89	Alter. media	-----	-----	-----	-----
Zn	124.47	Alter. media	110.85	Alter. media	-----	-----
Cr	20.94	Alter. muy alta	-----	-----	9.80	Alter. media
V	30.65	Alter. muy alta	18.90	Alter. muy alta	23.53	Alter. muy alta

Tabla 7. Regulaciones de los metales aerotransportados, límites de exposición y efectos sobre la salud. Cooper (Servicios Ambientales, 2010).

Metales Pesados	Límites Permisibles	Principales Fuentes	Reguladores
Be	0.02	Ocurre como un componente químico de ciertos tipos de rocas, carbón, petróleo, suelo y polvo volcánico. También está presente en una variedad de compuestos, tales como fluoruro de berilio, cloruro de berilio, sulfato de berilio, óxido de berilio y fosfato de berilio. El berilio se utiliza en componentes eléctricos, herramientas y componentes estructurales para aeronaves, misiles, satélites, algunos metales, televisores, calculadoras, ordenadores personales y otros productos de consumo.	Environmental Protection Agency (EPA)
Ni	0.02-1	El níquel se utiliza en aleaciones, galvanoplastia, baterías, monedas, plomería industrial, bujías, partes de maquinaria, acero inoxidable, cables de resistencia de níquel-cromo, quema de petróleo y/o refinación de petróleo y catalizadores.	Environmental Protection Agency (EPA)
Cu	0.1-1	Las fuentes de exposición son por humo; ya sea por la fundición de mineral de cobre, operaciones metalúrgicas relacionadas, soldadura, polvo de cobre, metal y sales (Minería), además de la producción de plaguicidas, industria química y tuberías metálicas.	World Health Organization (Ginebra, 1980)
Co	0.1-0.61	El cobalto se encuentra naturalmente en el medio ambiente. La población en general puede estar expuesta al cobalto en el aire, el agua potable y los alimentos. Los niveles de exposición más altos de lo normal para el cobalto pueden ocurrir en el aire y en el agua cerca de áreas industriales, particularmente cerca de sitios industriales de metal duro.	Environmental Protection Agency (EPA)
Sn	0.1-1	Derivado de la combustión de combustibles fósiles y residuos sólidos.	Environmental Protection Agency (EPA) World Health Organization (Ginebra, 1980)
Sb	0.032-0.55	El antimonio se encuentra naturalmente en el ambiente a niveles muy bajos. Las personas pueden exponerse a través del aire o polvo cerca de fábricas que convierten minerales de antimonio en metal, ingerir o tocar suelo contaminado cerca de sitios de desechos peligrosos o sitios de procesamiento de antimonio.	Environmental Protection Agency (EPA)
Zn	5-15	Los compuestos de zinc son ampliamente utilizados en la industria para hacer pintura, caucho, tintes, conservantes de madera y ungüentos. Muchas aleaciones contienen zinc, incluyendo latón y cobre. Refinerías, chapado metálico y fontanería.	World Health Organization (Ginebra, 1980)
Pb	0.5-1.5	La mayor fuente de plomo en la atmósfera ha sido la combustión de gasolina con plomo; sin embargo, los niveles de plomo en el aire han disminuido considerablemente con la reducción gradual del plomo en la gasolina. La exposición al plomo puede ocurrir por inhalación de plomo transportado por el aire debido a la combustión de desechos sólidos, carbón, aceites, emisiones por la producción de hierro, acero, fundiciones de plomo, humo de tabaco, pintura, pesticida y la emisión de automóviles.	World Health Organization (Ginebra, 1980)
Cr	0.02-0.05	El cromo es comúnmente producido por procesos industriales. La exposición a altos niveles de cromo se produce principalmente por la inhalación de cromo en el aire por la producción de ferrocromo, refinado de minerales, procesamiento químico y refractario, plantas productoras de cemento, revestimiento de frenos para automóviles y convertidores catalíticos para automóviles, curtiembres de cuero y pigmentos cromados.	World Health Organization (Ginebra, 1980)
V	0.5	La exposición al vanadio puede ocurrir mediante el consumo de alimentos que contienen vanadio, los niveles más altos se encuentran en los mariscos; respirar aire cerca de una industria que quema gasolina o carbón; estas industrias liberan óxido de vanadio en el aire; trabajando en industrias que lo procesan o fabrican productos que lo contengan; respirar aire contaminado o beber agua contaminada cerca de sitios de desechos o vertederos que contengan vanadio. El vanadio no es absorbido fácilmente por el cuerpo desde el estómago, el intestino o el contacto con la piel.	Environmental Protection Agency (EPA)
Th	0.2-1	Pequeñas cantidades de torio están presentes en todas las rocas, suelos, aguas subterráneas, plantas y animales. Estas pequeñas cantidades de torio contribuyen a la débil radiación de fondo para tales sustancias.	Lambert & Wilshire (1979)

Tabla 7. Continuación

Metales Pesados	Daños a la salud humana
Be	Riesgo de cáncer (cáncer de pulmón), afectaciones a la reproducción, en contacto con la piel rota puede causar úlceras o bultos (nódulos).
Ni	Desarrollo de cáncer de pulmón, laringe y próstata, daño en cavidad nasal, enfermedades y mareos ante exposición al gas de níquel. Malformaciones en bebés, asma, bronquitis crónica, reacciones alérgicas (erupciones cutáneas), desordenes al corazón.
Cu	Causas de daño al hígado y los riñones, causa de muerte, irritación en la nariz, la boca y los ojos, causa dolor de cabeza, de estómago, mareos, vómitos y diarreas.
Co	Efectos en los pulmones, asma, neumonía, pulmonía, alergia al cobalto, salpullido en la piel, problemas de corazón, daño de tiroides, problemas de visión vómitos y nauseas.
Sn	Genera enfermedades pulmonares, problemas de corazón, diarrea, vómitos severos y úlceras estomacales, irritación de los ojos, piel y pulmones.
Sb	Causa daños hepáticos, disfunción del sistema inmunitario, escasez de glóbulos rojos, daños cerebrales (provocando ira, trastornos del sueño, olvidos y dolores de cabeza), irritación de ojos y piel, estómago, vómito y mareos, sudoración severa, falta de aliento, problemas para orinar.
Zn	Causa de úlcera de estómago, irritación de la piel, vómitos, náuseas, anemia, daño en el páncreas, causa de arterioesclerosis y desordenes respiratorios, pérdida del apetito, disminución de la sensibilidad, el sabor, el olor, y causa de erupciones cutáneas.
Pb	Perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y sistema nervioso, anemia, incremento de presión sanguínea, daño a riñones, aborto, disminución de la fertilidad masculina, disminución de habilidades de aprendizaje en niños, perturbación (agresión, comportamiento impulsivo e hipersensibilidad), daños en el feto (sistema nervioso y cerebro).
Cr	Causa de cáncer (cáncer de pulmón), problemas en vías respiratorias, estomago e intestino delgado y daños en el sistema reproductivo masculino.
V	Causa de daño en el sistema respiratorio (pulmones y alvéolos), tracto gastrointestinal (hígado), problemas en los huesos y órganos como el riñón, bazo, pulmón, entre otros.
Th	Causa de cáncer de huesos, enfermedades del hígado, de pulmón (cáncer de pulmón y páncreas) y daños en el material genético.

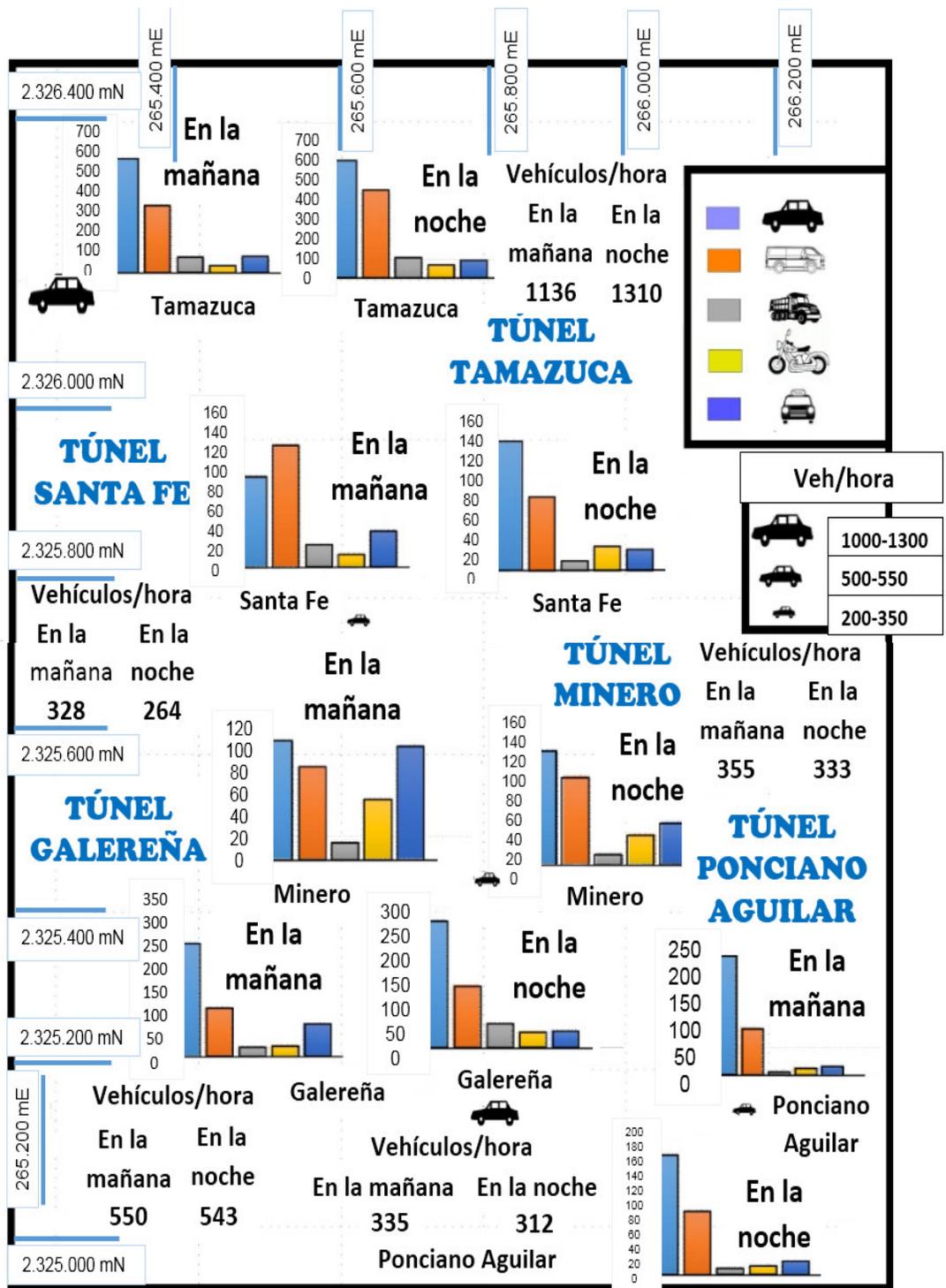


Figura 4. Aforo vehicular que transita por los túneles de la ciudad de Guanajuato.

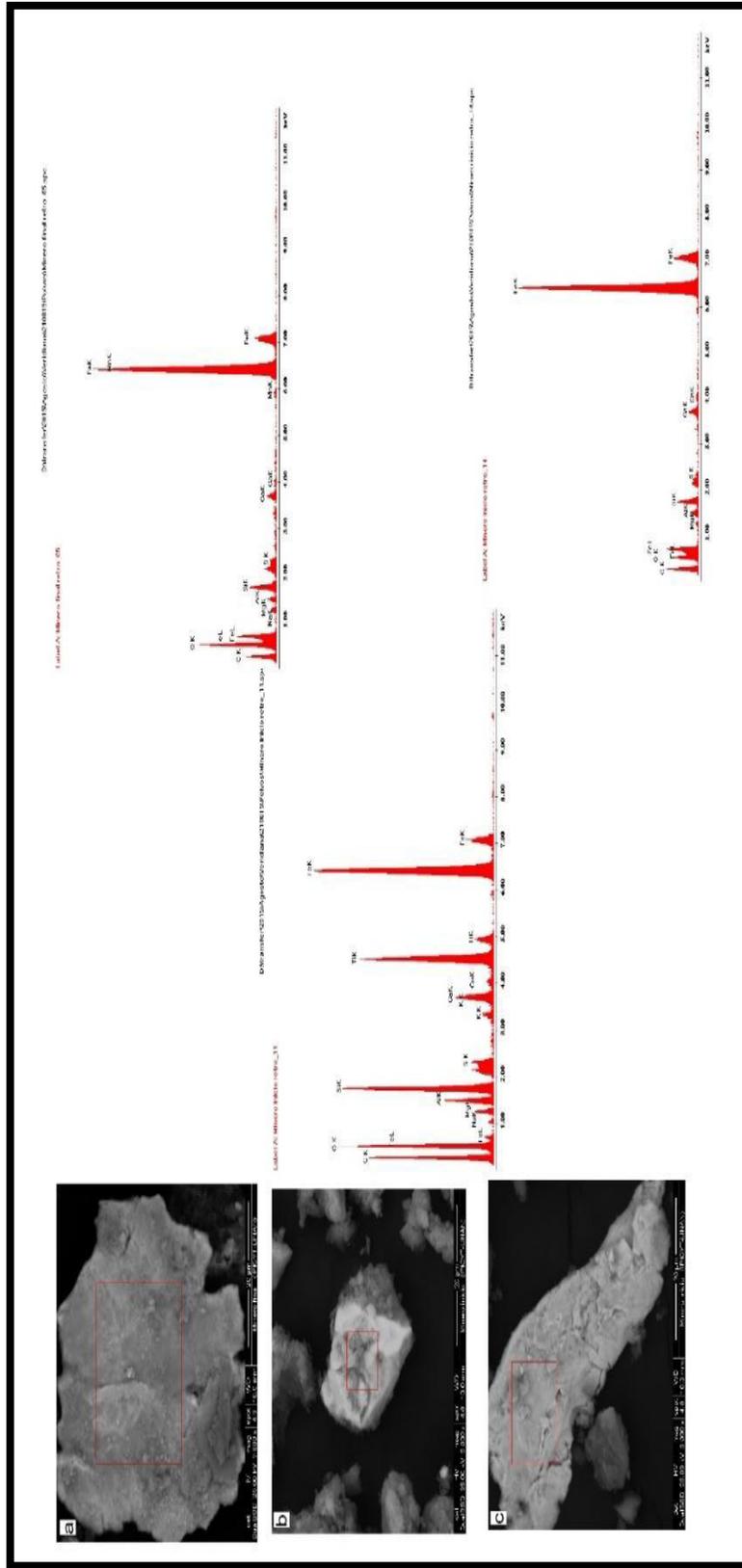


Figura 5. Imágenes en Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) con Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS).

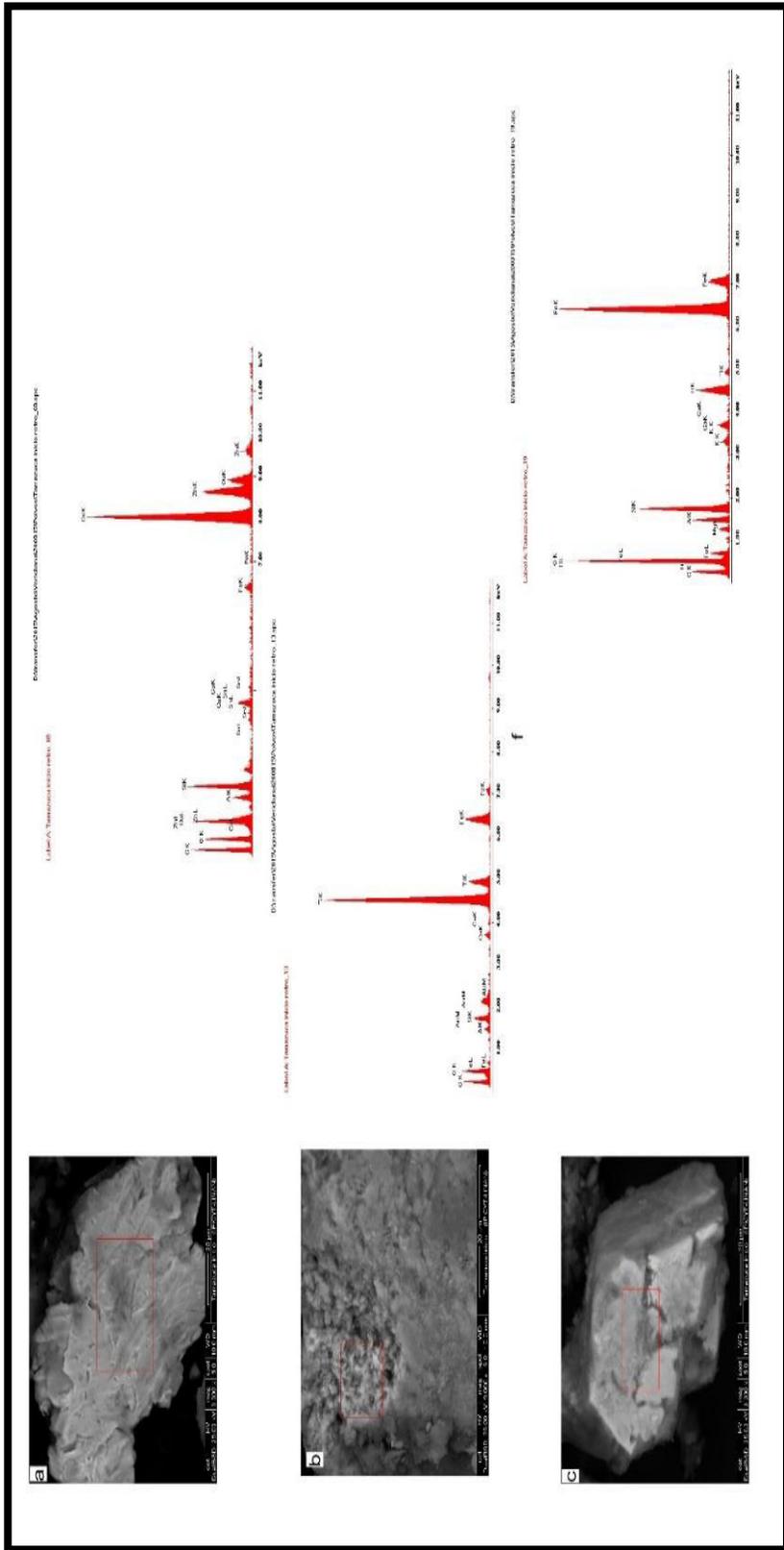


Figura 6. Continuación

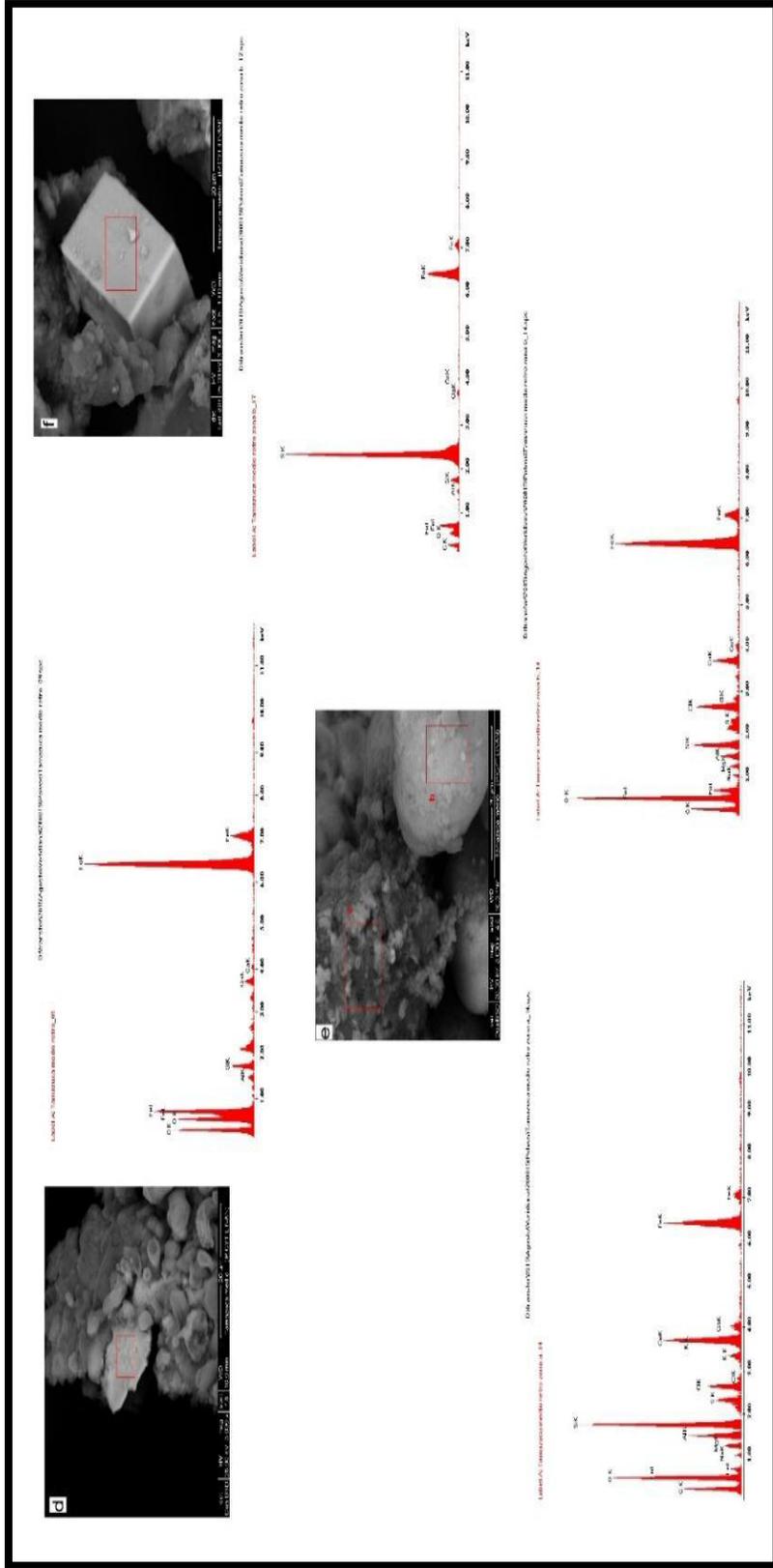


Figura 6. Continuación

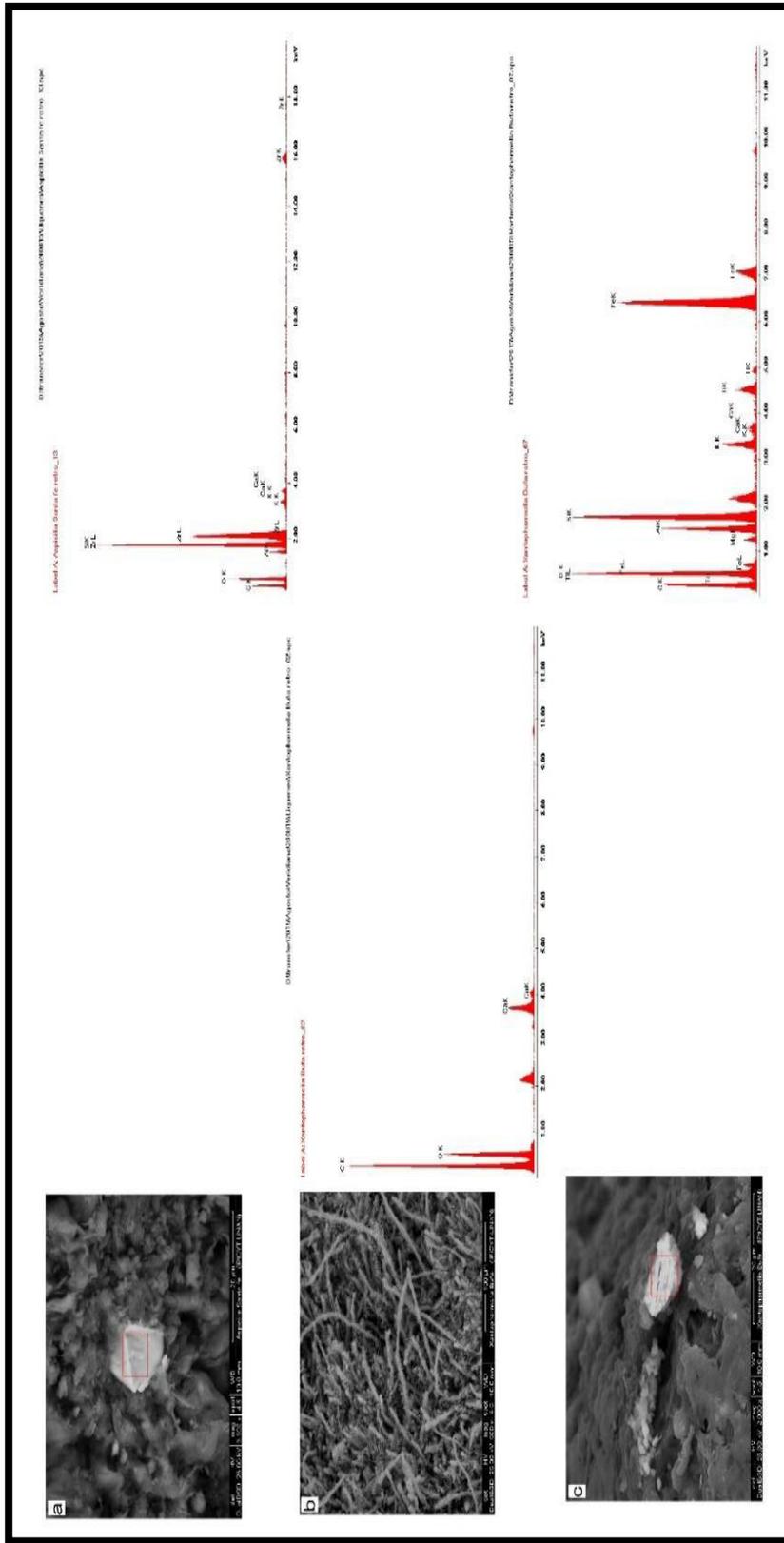


Figura 7. Continuación

CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN

Para este estudio los niveles de metales pesados en los líquenes con la deposición atmosférica reflejan el nivel tóxico de metales pesados en nuestro medio ambiente y da evidencia de una contaminación del aire por las áreas industriales (industria minera) y el tráfico pesado.

El presente trabajo muestra la importancia de los líquenes saxícolas como bioacumuladores de metales pesados en la ciudad de Guanajuato. Pb, Zn, Ni, Sn, Sb, Co, Cr y Cu estos son los elementos más pronunciados y detectados por los líquenes. La variación en las concentraciones de metales pesados entre los sitios estudiados se debe al alto volumen de tráfico y a las actividades industriales. Sin embargo, la emisión del tráfico resultó ser la principal fuente de contaminación de metales a la atmósfera en los túneles de la ciudad de Guanajuato.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran la utilidad de líquenes saxícolas para detectar metales pesados en Guanajuato y en la identificación de fuentes contaminantes que pudieran estar afectando a ésta ciudad. Como resultado, los líquenes *Aspicilia sp* y *Xanthoparmelia* fueron los más tolerantes y los que acumularon más altos niveles de los metales pesados analizados.

Los actuales datos de biomonitoreo de líquenes proporcionan evidencia preliminar que indica actividad vehicular como resultado del crecimiento de la población y el aumento del tráfico. La sensibilidad de los líquenes al aire contaminado y su capacidad para acumular metales pesados y retenerlos durante un largo período de tiempo, lo convierten en una herramienta

beneficiosa en el biomonitoreo de diversos contaminantes aéreos de metales pesados.

Así mismo para los túneles de la ciudad de Guanajuato el tipo de situación ambiental resultó estar en un nivel alto en comparación con otros estudios de contaminación elaborados en otras partes del mundo que de igual manera emplearon los líquenes como bioindicadores y/o bioacumuladores de contaminación atmosférica relacionados al tráfico vehicular, el resultado fue debido a que los túneles son espacios confinados con ventilación deficiente lo que propicia que los contaminantes se concentren en niveles que pueden llegar a ser un riesgo para la población, por lo que es necesario emplear algún tipo de remediación ambiental para los túneles y así reducir su nivel de contaminación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adeniyi AA. , 1996. Determination of cadmium, copper, iron, lead, manganese, and zinc in water leaf (*Talinum triangulare*) in dump sites. *Environ Int*: 6(22):1 – 4.
- Andrés, D., Ferrero, E. y Mackler, C. (2000). Monitoreo de contaminantes del aire en la ciudad de Rosario. Recuperado de:http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/investigacion/gese/publicaciones/gese_facchile.pdf
- 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.
- Batic F. Bioindication of sulphur dioxide pollution with lichens. En: Kranner I, Beckett RP, Varma AK (Eds.) *Protocols in Lichenology*. Berlin, Springer-Verlag, 2002: 483-503.
- Bedregal, P., Torres, B.; Mendoza, P., Ubillús, M., Hurtado, J., Maza, I. y Espinoza, R. (2005). *Uso de Usnea sp. 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.
- Bernasconi, E., De Venito, I.E., Martínez, L. D. y RABA, J. (2000). Liqueen *Usnea densirostra* como bioindicador de metales pesados. Determinación por ICP-AES acoplado con nebulizador ultrasónico. *Ars Pharmaceutica*, 41, 249-257.

- Canseco, A., Anze, R. & Franken, M. (2006). Comunidades de líquenes: indicadores de la calidad del aire en la ciudad de La Paz, Bolivia. *ACTA NOVA* 3, 286- 307. Recuperado de <http://www.ucbcba.edu.bo/Publicaciones/revistas/actanova/documentos/v3n2/v3.n2.Canseco.pdf>
- Chettri, M.K., 1997. Responses of lichens *Cladonia convoluta* (Lam.) and *Cladonia rangiformis* (L.) Hoffm. To the effects of toxic heavy metals. *Scientific Annals of the School of Biology*, Appendix no.59. Aristotle University of Thessaloniki, Greece (in Greek language with extended English summary).
- Conti, M. E., Cecchetti, G., 2001. Biological Monitoring: Lichens as Bioindicator of Air Pollution Assessment—A Review, *Environmental Pollution*, Vol. 114, No. 3, pp. 471-492. Doi: 10.1016/S0269-7491(00)00224-4.
- Dirección de Extensión Cultural (Universidad de Guanajuato). (2011) “*Túneles de Guanajuato*” (Archivo de video).
Recuperado de:
<https://www.youtube.com/watch?v=sKB0hKdCzPE>
- Environmental Protection Agency (EPA), (1989). Interim Methods for Development of Inhalation Reference Doses. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Health and Environmental Assessment. *Washington, DC*. EPA 600/8-88-066F.
- Fuga, A., Saiki, M., Marcelli, M. & Saldiva, P. (2008). Atmospheric pollutants monitoring by analysis of epiphytic lichens. *Environmental Pollution*, 151, 334-340.
- García AZ, Coyotzin CM, Amaro AR, Veneroni DL, Martínez CL, Iglesias GS ,2009. Distribution and sources of

bioaccumulative air pollutants at Mezquital Valley, Mexico, as reflected by the atmospheric plant *Tillandsia recurvata* L. *Atmos Chem Phys* 9:6479–6494.

Garty J. Biomonitoring heavy metal pollution with lichens. In: Kranner I, Beckett RP, Varma AK (Eds.) *Protocols in Lichenology*. Berlin, Springer-Verlag, 2002: 458-482.

Ginebra, 1980. World Health Organizatiun. Recuperado de: www.who.int/gho/indicatorregistry.

Hawksworth, D., Iturriaga, T. y Crespo, A. (2005). Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. *Rev Iberoam Micol*, 22, 71-82. Recuperado de: <http://www.reviberoammicol.com/2005-22/071082.pdf>

Heinrich G, Remele K. Biomonitoring radionuclide deposition with lichens. In: Kranner I, Beckett RP, Varma AK (Eds.) *Protocols in Lichenology*. Berlin, Springer-Verlag, 2002: 425-457.

Lambert JPF, Wilshire FW. 1979. Neutron activation analysis for simultaneous determination of trace elements in ambient air collected on glass-fiber filters. *Anal Chem* 51:1346-1350.

Lijteroff, R., Lima, L. & Prieri, B. (2009). Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25, 111-120.

Loppi, S., Pirintsos, S.A., Dominicis, V.D., 1999. Soil contribution to the elemental composition of Epiphytic lichens (Tuscany, Central Italy). *Environ. Monit. Assess.* 58, 121–131.

- Nieboer, E., D.H.S. Richardson and F.D. Tomassini, 1978. Mineral uptake and release by lichens: An overview. *Bryologist* 81(2): 226-246.
- Nimis, P.L., Bargagli, R., 1999. Linee-guida per l'utilizzo dei licheni epifiti come bioaccumulatori di metalli in traccia. In: *Proc. Workshop Biomonitoraggio della qualità dell'aria sul territorio nazionale, Roma, 26-27 Giugno 1998*. ANPA-Serie Atti, pp. 279-287.
- Nimis, P.L., Lazzarin, G., Lazzarin, A., Skert, N., 2000. Biomonitoring of trace elements with lichens in Veneto (NE Italy). *Sci. Total Environ.* 255, 97-111.
- Nriagu, J.O. and J. Pacyana: Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soil by trace metals. *Nature*, 333, 134-139 (1988).
- Pirintsos SA, Matsi T, Vokou D, Gaggi C, Loppi S (2006) Vertical distribution patterns of trace elements in an urban environment as reflected by their accumulation in lichen transplant. *J Atmos Chem* 54:121-131.
- Puy-Alquiza, M.J., Miranda-Avilés, R., Reyes Zamudio, V., Salazar-Hernández, Ma. M., Salazar-Hernández, Ma. Del C., (2013). Impacto de las comunidades liquénicas en el deterioro de monumentos históricos: interface liquen-roca. *Revista Mexicana de Micología*.
- Quilhot W, Fernández E, Rubio C, Goddart M, Hidalgo ME. Lichen secondary products and their importance in environmental studies. In: Marcelli MP, Seaward MRD (Eds.) *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications*. São Paulo, CETESB, 1998: 171-179.

Sawidis, T., M.K. Chettri, G.A. Zachariadis, J.A. Stratis and M.R.D. Seaward, 1995. Heavy metal bioaccumulation in lichens from Macedonia in North Greece. *Toxicological and Environmental Chemistry* 50, 157-166.