

**Líquenes como bioindicadores para la evaluación de la contaminación del aire por fuentes
móviles**

Ángela María García Jaramillo

Isabel Cristina Pineda Arboleda

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente- ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Dosquebradas, Risaralda

2022

**Líquenes como bioindicadores para la evaluación de la contaminación del aire por fuentes
móviles**

Ángela María García Jaramillo

Isabel Cristina Pineda Arboleda

Trabajo para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director:

Kevin Alberto Berthi Mantilla

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente- ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Dosquebradas, Risaralda

2022

Kevin Alberto Berthi Mantilla

Director Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

Dosquebradas-2022

Agradecimientos

A Dios, quien nos dio la fuerza y la sabiduría para cursar este camino extenso por la Universidad Nacional Abierta y a Distancia y por supuesto a nuestras familias de quienes recibimos apoyo, comprensión y cariño en todo momento, mil gracias por hacer parte de este proceso.

Resumen

En el presente estudio se evaluó la calidad del aire urbano de los municipios de Dosquebradas y Pereira usando las comunidades de líquenes como bioindicadores, se tomaron tres áreas de estudio de estos dos municipios analizando la diversidad y la composición de las comunidades de líquenes y un área de control que en este caso será la serranía del alto del nudo. En las cuatro zonas donde se realizará el monitoreo se aplicará la metodología para el análisis de datos cuantitativos, más conocido como “cartografía de líquenes a cada forofito seleccionado”. Se trabajará con una rejilla de relevamiento de líquenes, conformada por 10 recuadros (2x5 cuadrados), los recuadros de cada rejilla tendrán un área de 10x10 cm² aproximadamente entre una altura de 1,50 hasta 2 metros que es donde generalmente se ve más afectadas las personas por la contaminación del aire, este indicador es utilizado para determinar el Índice de Pureza Atmosférica (IPA).

Palabras claves: Bioindicadores, Contaminación atmosférica, Líquenes.

Abstract

In this study the urban air quality of the municipalities of Dosquebradas and Pereira was evaluated using lichen communities as bioindicators, three study areas were taken from these two municipalities analyzing the diversity and composition of lichen communities and a control area which in this case will be the serranía del alto del nudo. In the four areas where the monitoring will be carried out, the methodology for the analysis of quantitative data, better known as "lichen mapping will be applied to each selected phorophyte." A lichen survey grid will be used, made up of 10 squares (2x5 squares), The squares of each grid will have an area of 10x10 cm² approximately between a height of 1.50 to 2 meters, which is where people are generally more affected by air pollution, this indicator is used to determine the Atmospheric Purity Index (API).

Keywords: Atmospheric pollution, Bioindicators, Lichens.

Tabla de contenido

Introducción	13
Problema	16
Justificación	19
Objetivos	22
Objetivos específicos	22
Marco teórico	23
Contaminación atmosférica	23
Fuentes móviles:	25
Bioindicadores como monitores de la calidad del aire	26
Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire	26
Metodología (o Materiales y métodos)	29
1. Zona de estudio	29
2. Selección de puntos de muestreo y toma de datos de las comunidades liquénicas	30
3. Análisis de los datos:	36
Resultados	38
Selección de puntos de muestreo y toma de datos de las comunidades liquénicas	38
Caracterización arbórea	40
Cartografía de líquenes	43
Conteo de Líquenes	46
Composición de la comunidad liquénica	73
Índice de pureza atmosférica (IPA)	75

Categorización de las zonas a partir de los contaminantes atmosféricos:	79
Discusión.....	81
Conclusiones.....	83
Referencias bibliográficas.....	85

Lista de tablas

Tabla 1	41
Tabla 2	41
Tabla 3	42
Tabla 4.....	43
Tabla 5.....	44
Tabla 6.....	47
Tabla 7.....	48
Tabla 8.....	49
Tabla 9.....	50
Tabla 10.....	51
Tabla 11.....	53
Tabla 12.....	54
Tabla 13.....	55
Tabla 14.....	57
Tabla 15.....	57
Tabla 16.....	58
Tabla 17.....	60
Tabla 18.....	62
Tabla 19.....	63
Tabla 20.....	64
Tabla 21.....	65
Tabla 22.....	67

Tabla 23.	68
Tabla 24.	69
Tabla 25.	70
Tabla 26.	72
Tabla 27.	73
Tabla 28.	74
Tabla 29.	76
Tabla 30.	77
Tabla 31.	78
Tabla 32.	79

Lista de figuras

Figura 1	24
Figura 2.	29
Figura 3.	31
Figura 4.	31
Figura 5.	32
Figura 6.	32
Figura 7.	33
Figura 8.	34
Figura 9.	35
Figura 10.	38
Figura 11.	48
Figura 12.	49
Figura 13.	51
Figura 14.	52
Figura 15.	53
Figura 16.	55
Figura 17.	56
Figura 18.	58
Figura 19.	60
Figura 20.	61
Figura 21.	62
Figura 22.	64

Figura 23.	65
Figura 24..	66
Figura 25.	67
Figura 26.	69
Figura 27.	70
Figura 28.	71
Figura 29.	72

Introducción

Con el transcurrir de los años se ha experimentado un crecimiento elevado de la población mundial; la relación entre el aumento poblacional y el medio ambiente es muy evidente, el incremento de la producción industrial y de energía han generado durante todo este tiempo contaminantes y desechos que deterioran el medio ambiente; el aire, es uno de los recursos que ha sufrido mayores alteraciones, su composición se está viendo afectada y modificada principalmente por las emisiones provenientes de actividades antropogénicas, los niveles percibidos de algunos gases contaminantes debido a la industrialización y al parque automotor tales como CO₂, PM₁₀, NO₂, PM 2.5 entre otros ha logrado degradar la capa de ozono generando así que sus diferentes partículas contaminadoras afecten a gran magnitud e intensidad la estabilidad de los ecosistemas y la salud de la población principalmente en el sistema respiratorio, ocular y cardiovascular a causa de inhalar los gases contaminantes que están presentes en la atmosfera.

El parque automotor ha logrado un incremento en su desarrollo debido al crecimiento de la economía en Colombia, no obstante, cabe resaltar los efectos negativos que trae consigo esta actividad como es el aumento de emisiones de concentración de gases tóxicos que es uno de los principales problemas de contaminación del aire en distintas ciudades de nuestro País.

Pereira y Dosquebradas, son dos ciudades del departamento de Risaralda que han presentado este problema de emisiones por fuentes móviles debido a que es un área importante de paso nacional para vehículos, además, es relevante mencionar que según la cámara de comercio de Pereira “son un total de 46.000 automóviles y 51.000 motos los que diariamente se movilizan por las principales arterias viales de la ciudad generando emisiones” (Vega lemus, 2019); por ello La CARDER cuenta con un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA)

que se compone de tres equipos para la medición de PM10, PM 2,5 y gases de tipo SO2 y NO2; los cuales están distribuidos en dos puntos de Pereira, y uno en Dosquebradas.

Ahora, si bien es cierto que los reportes generados por estas estaciones de medición vienen siendo de mucha utilidad también hay que tener presente que la instalación de una estación de monitoreo suele requerir una inversión significativa, por lo que sería necesario proponer métodos alternativos que nos permita hallar y medir ciertos contaminantes atmosféricos a un menor costo sin que ello signifique subestimar el sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) de la CARDER.

Para la medición de la calidad del aire existen diferentes tipos de métodos Físico/Químicos bien establecidos que permiten calcular el nivel de contaminación presente en la atmosfera, sin embargo, encontramos a los bioindicadores los cuales aportan una respuesta medible y proporcional al grado de contaminación, estos son indicadores consistentes en una especie vegetal, hongo o animal que nos permiten obtener información de manera rápida, económica y eficiente sobre determinadas características ecológicas que afectan en alto grado el ecosistema, en este caso los usaremos para que nos permitan conocer el nivel de impacto de la contaminación atmosférica en las ciudades de Pereira y Dosquebradas respectivamente teniendo en cuenta las zonas de estudio planteadas con antelación.

Los líquenes son uno de los muchos bioindicadores existentes, estos son formados por la asociación entre un hongo y un alga verde permitiéndoles así vivir en una asociación simbiótica mutualista, son de suma importancia desde el punto de vista medio ambiental ya que se podrían catalogar como indicadores que con sus características morfológicas nos permite obtener o deducir el grado de contaminación existente en una zona. Estos bioindicadores absorben cualquier tipo de componente toxico lo que nos permite en este caso como ingenieros

ambientales realizar un análisis puntual del nivel de afectación que están teniendo en la zona de muestreo a nivel atmosférico e indicar el potencial ecológico del líquen como bioindicador.

Debido a las pocas estaciones de monitoreo presentes en estos dos municipios (tres) se planteó realizar dicho estudio por medio de los líquenes como bioindicadores en las siguientes zonas previamente escogidas:

El primer punto de muestreo se sitúa en la carrera cuarta entre las calles 25 y 26, el punto dos se encuentra en la avenida las Américas y el tercer punto se encuentra en Dosquebradas, avenida del Ferrocarril - Calle 25 con carrera 16. Además, se decidió trabajar con una zona testigo que se localiza en la serranía alto del nudo el cual tiene jurisdicción en los municipios de Pereira, Dosquebradas, Santa Rosa y Marsella.

Si bien existen diferentes métodos para analizar la calidad del aire, a partir de la década de los años 60 comenzó el desarrollo de la bioindicación como medio garantizado para medir la calidad del aire es por ello y por las numerosas ventajas frente a los métodos tradicionales que se decidió usar a los líquenes como bioindicadores para la evaluación de la contaminación del aire por fuentes móviles. El simple hecho de el nivel de sensibilización que estos presentan y que gracias a su biología nos permite tener acceso a información de contaminantes obtenidos ya que debido a que estas especies viven millones de años generan un efecto acumulativo de los contaminantes permitiendo tener mayor acceso a estos bioacumuladores. Estos carecen de estomas y cutículas lo que facilita la absorción por todo el tallo del bioindicador. Al hacer uso de dichos bioindicadores nos permiten zonificar y enfocar planes de mejoramiento en estas dos ciudades, generando así la disminución del impacto de contaminantes en el aire y mejorando la calidad de vida para la población.

Problema

La contaminación del aire ha sido de primordial interés a nivel mundial y regional. Dicha preocupación ha tomado fuerza en las últimas décadas debido a que el crecimiento demográfico, el mal manejo de los recursos naturales, la industrialización y el aumento de las fuentes móviles han acelerado los procesos de contaminación del aire. Las fuentes móviles a nivel mundial y generalmente en países en vías de desarrollo generan un porcentaje muy significativo en emisiones atmosféricas (Lin et al., 2020), además, la contaminación antropogénica del aire se mezcla con el agua lluvia generando efectos negativos como el fenómeno de la lluvia ácida, el cual ha tenido un impacto negativo en las zonas boscosas especialmente en organismos sensibles a este tipo de contaminación (Mora Barrantes et al., 2021).

Según el SIAC (Sistema de Información Ambiental de Colombia), el material particulado es emitido especialmente debido a la quema de combustibles fósiles por el parque automotor, estimando que aproximadamente el 80% de las partículas con diámetro igual o inferior a 2.5 micrómetros (PM2.5) son generadas por fuentes móviles (IDEAM, 2021). De igual manera sucede con el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO₂) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), siendo responsables de los principales procesos que aportan a la emisión de estos contaminantes según el Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2018 (IDEAM, 2019). Estudios realizados, han demostrado que las ciudades con mayor contaminación del aire son Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, el valle de Sogamoso, Bucaramanga, Cartagena y Pereira, generando el 41% del material contaminante del aire en el país, de acuerdo con el informe del estado de la calidad del aire emitido por el IDEAM en el año 2012 y que corresponde al periodo de monitoreo del 2007 al 2010 (Pérez Cárdenas, 2017).

Durante los últimos años, el Área Metropolitana Centro Occidente conformada por los municipios de Pereira y Dosquebradas han ido presentado un incremento poblacional, que al mismo tiempo implica un crecimiento en el sector industrial, sector residencial y vehicular, ocasionando disminución de biodiversidad por la pérdida de zonas verdes a causa de la construcción de infraestructura, la agricultura intensiva, y contaminación vehicular por emisiones gaseosas de combustión. Como efecto, se ha visto disminuida la calidad ambiental de estos dos municipios, sobre todo el recurso aire, como se mencionó anteriormente ubicando a la ciudad de Pereira dentro de las 8 ciudades con mayor contaminación atmosférica en el país (Pérez Cárdenas, 2017). Las principales fuentes de emisiones contaminantes son las fuentes móviles, aportando aproximadamente el 75% del total de las emisiones (Morales et al., 2012) (Wei et al., 2021)

Es evidente el impacto de la contaminación atmosférica en los seres humanos, causando efectos negativos en la salud de los habitantes de estos dos municipios especialmente en la zona urbana. Estudios han evidenciado que las infecciones respiratorias agudas, enfermedades cardiovasculares y cerebrovasculares han aumentado a causa de esta problemática ambiental que se viene dando cada vez con mayor fuerza generando costos sociales (Root et al., 2021), por lo tanto se hace plausible realizar un diagnóstico a estos dos municipios para luego tomar medidas de mitigación y/o de prevención. De acuerdo con lo anterior, se requiere determinar cuáles son los niveles de contaminación del aire mediante recursos de control y biomonitoreo para poder asumir medidas posteriores, teniendo en cuenta que las estaciones de monitoreo solo brindan una parte de la información en las labores de observación, también se debe tener presente ¿cuál sería el grado de contaminación del aire utilizando líquenes como bioindicadores en las ciudades de

Pereira y Dosquebradas? y si se llegará a trabajar con este método de monitoreo atmosférico
¿cuáles serían los beneficios a la población afectada?

Justificación

La atmosfera es un bien común e indispensable para todos los seres vivos, es por ello por lo que es de suma importancia tener control y/o monitoreo del impacto ambiental sobre este recurso. La calidad del aire es el resultado de las interacciones dinámicas de la sociedad urbana y rural, de las emisiones provenientes de la agricultura, industria, minería, transporte, así como de las tecnologías utilizadas, las condiciones climatológicas y geomorfológicas, el consumo y tipo de combustible, entre otros aspectos que influyen notablemente en los procesos de concentración, dilución, y transporte, que varían la composición y concentración del aire (IDEAM, 2019).

Actualmente nos encontramos ante una problemática, la cual ubica a la contaminación atmosférica como el principal factor de riesgo ambiental, por encima de la mala calidad del agua y la exposición a metales tóxicos o peligrosos (IDEAM, 2019), además, valorar y cuantificar el aumento o descenso de la contaminación del aire suele ser por monitoreo fisicoquímico lo que implica un alto costo llegando hacer muy difícil tener acceso a la información preliminar. Por tal motivo y con el fin de dar una alternativa a esta problemática se propone trabajar en este proyecto con bioindicadores para la medición de los niveles de contaminación atmosférica en este caso los líquenes; estos epifitos se desarrollan normalmente en un entorno libre de materias o formas de energía que implican riesgo al medio ambiente y es común observar a los líquenes viviendo sobre troncos de árboles o rocas, cuando su entorno cambia sus poblaciones tienden a disminuir o dependiendo de la especie desaparecen del todo. Estos han sido estudiados a lo largo de los años y en varios países del mundo como Italia (Nimis et al., 1991), Estados Unidos (Jovan y Mccune, 2005), Serbia (Stamenković et al., 2010), Argentina (Lijteroff et al., 2009), Colombia (Olaya y Valencia, 2006), entre otros.

La biomonitorización de líquenes se basa en la observación de las comunidades líquénicas, la cual permite dar cuenta de su desaparición y/o disminución junto con las alteraciones morfológicas que puedan aparecer (Zárate-Arias et al., 2019). La forma de distribución de una especie de líquen nos puede indicar niveles de un contaminante en el aire, es por ello por lo que se tomó como base central en la presente propuesta. Actualmente, se ven referenciados diferentes estudios que toman los líquenes como bioindicadores para analizar la calidad del aire en diferentes partes de país, entre éstas podemos encontrar a Bogotá, Chocó y el Caribe, en donde investigadores concluyeron que las comunidades de líquenes son altamente sensibles para identificar gradientes de contaminación atmosférica (Valois Cuesta y Mosquera Palacios, 2014), así mismo se encontró que el IPA (Índice de Pureza Atmosférica) obtenido en las diferentes zonas estudiadas presentan altos grados de contaminación atmosférica lo que se debe según lo encontrado en los informes, a condiciones de alto flujo vehicular en las avenidas que rodean las zonas de muestreo y la escasa presencia de árboles dentro de las mismas zonas (Valois Cuesta y Mosquera Palacios, 2014).

El uso de los líquenes en estudios medioambientales se ha convertido en útil señal de alarma en la detección de alteraciones de la calidad atmosférica por contaminantes como el dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃), hidrocarburos clorados, óxidos de nitrógeno (NO_x), amoníaco, fluoruros, PM₁₀, PM_{2.5}, metales y metales radioactivos; así como también la lluvia ácida (Lijteroff et al., 2009), igualmente el líquen como bioindicador presenta una variedad de ventajas frente a métodos más tradicionales a la hora de evaluar una alteración en el aire, por ejemplo los bioindicadores incluyen el componente temporal correspondiente a la residencia de un organismo permitiendo así la integración del presente, pasado y futuro de las condiciones ambientales, pueden ser muestreados durante todo el año, son abundantes y comunes en los

ecosistemas, taxonómicamente bien documentados y estables; por ende, este proyecto busca comprender más a fondo la problemática de contaminación atmosférica en ambas ciudades pudiendo así encontrar estrategias de mitigación y de compensación a su vez.

Es importante mencionar que estos permiten a gran escala evaluar la calidad del medio ambiente y así mismo su evolución respecto al tiempo. Al implementar la propuesta de este proyecto aplicado permitirá ampliar conocimientos sobre uso de líquenes como bioindicadores en la contaminación del aire en las ciudades de Pereira y Dosquebradas respectivamente, teniendo en cuenta que realizando una revisión minuciosa se encontró que, para la zona de estudio, actualmente no se han realizado análisis de este tipo con líquenes, lo que permite hacer más enriquecedor el planteamiento de este proyecto y la importancia de su desarrollo.

Debido a la necesidad del uso de alternativas de monitoreo y el bajo costo de la utilización de líquenes, además de su eficacia como bioindicador, se hace plausible proponer el uso de estos epífitos en métodos de medición de la contaminación atmosférica. De esta manera se propone en el presente proyecto aplicado trabajar con bioindicadores para determinar de manera alternativa los niveles de concentración de contaminantes en zonas específicas de los municipios de Pereira y Dosquebradas.

Objetivos

Evaluar el nivel de contaminación atmosférica mediante el uso de líquenes como bioindicadores en los municipios de Pereira y Dosquebradas.

Objetivos específicos

Determinar las estaciones de muestreo mediante la identificación y selección del forofito en la zona de estudio.

Recolectar los datos de las especies liquénicas e identificarlas por género y/o especie.

Analizar los datos cuantitativos (cartografía de líquenes a cada forofito seleccionado) para su clasificación.

Establecer el grado de contaminación atmosférico mediante el cálculo del índice de Shannon, índice Simpson e índice de pureza atmosférica (IPA) en la zona de estudio.

Marco teórico

Contaminación atmosférica

El término contaminación atmosférica posee diferentes definiciones, aunque todas referidas a la presencia de sustancias o elementos que afectan la composición de la atmósfera, de igual manera, afectando los ecosistemas o ya desde el punto de vista antropocéntrico causando daños en la salud y por ende el bienestar de la sociedad. Según su origen, los contaminantes del aire se clasifican en dos grupos: Antropogénicos, los cuales proceden de actividades humanas, y biogénicos o de origen natural procedentes de la naturaleza; un ejemplo de estos son las erupciones volcánicas (Ubilla y Yohannessen, 2017).

Según su estado físico se ordenan en gases y partículas; para los gases el tiempo de residencia depende de su capacidad de reacción siendo los más reactivos los que permanecen menos tiempo en el aire (IDEAM, 2019). Los gases más comunes en la atmósfera son óxidos de nitrógeno (NO_x), de azufre (SO_x), el monóxido de carbono (CO), el ozono (O₃) y los hidrocarburos. El tiempo de residencia para las partículas dependen de su composición y tamaño, generalmente estas contienen compuestos orgánicos (hidrocarburos aromáticos policíclicos e/o inorgánicos como sales y metales), si son muy pequeñas suelen mantenerse suspendidas denominándolas respirables a las de un diámetro menor o igual a 10 µm (PM₁₀) por su capacidad de introducirse en las vías respiratorias y suelen ser transportadas a largas distancias ocasionando contaminación por partículas en sitios que no fueron emitidos, generalmente son aerosoles y polvo (Oyarzún G, 2010).

La transformación de los contaminantes atmosféricos es muy variada, algunos sobresalen por sus efectos o por su elevada proporción en el aire, estos se consideran primarios cuando son

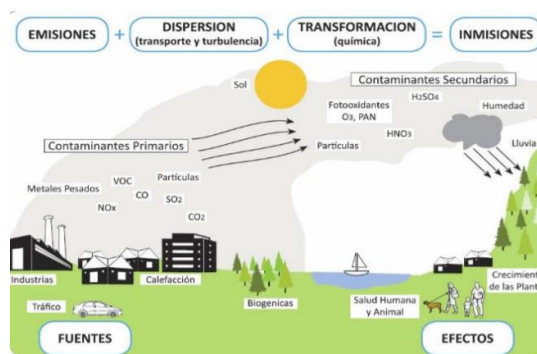
emitidos directamente por una fuente, por ejemplo, el monóxido de carbono (CO); o contaminantes secundarios, cuando se forman en la atmosfera a partir de reacciones químicas de las fuentes primarias, un ejemplo de esta es el ozono (O₃), los ácidos sulfúricos y nítricos.

Las fuentes de contaminación atmosférica son categorizadas según como se liberen los contaminantes al aire, clasificándose de esta manera en fuentes fijas las cuales generan emisiones en un lugar determinado e inflexible, para las fuentes móviles su principal causa es por la quema de combustibles fósiles utilizados en el parque automotor emitiendo óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxidos de azufre hidrocarburos no quemados y compuestos orgánicos no volátiles.

Según el instituto de Hidrología y Meteorología de Estudios Ambientales IDEAM, los mayores niveles de contaminación atmosférica se presentan en las zonas urbanas lo que representa aproximadamente el 74% de la población, siendo la causa principal el uso de combustibles fósiles, y los contaminantes con mayor incumplimiento de los límites máximos permisibles son el material particulado PM_{2.5}, PM₁₀ y partículas suspendidas totales (PST) (IDEAM, 2021).

Figura 1

Ciclo de los contaminantes en el aire (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, 2019)



Fuente: Google imágenes. (2019)

Fuentes móviles

Las fuentes móviles requieren para su funcionamiento el uso de combustibles fósiles emitiendo así contaminantes como son los gases de efecto invernadero, el monóxido de carbono (CO), material particulado PM10, PM 2.5, óxidos de nitrógeno, (NOx), metales pesados (Lin et al., 2020), teniendo como resultado ser la principal fuente de contaminación ambiental en las ciudades capitales a nivel global (Abhijith et al., 2017).

Uno de los principales factores de las fuentes móviles es el modelo del vehículo, es decir, el año que se fabricó ya que por el diseño del motor la combustión no sería la más eficiente, así como también su mantenimiento (Onursal & Gautam, 1997).

Para las fuentes fijas también se debe de tener en cuenta su tecnología implementada en la industria ya que estas emiten contaminantes dependiendo del tipo de combustible, del proceso productivo, de la eficiencia en el uso de la energía o también, de las condiciones del sitio (Lee y Lee, 2021).

El material particulado es uno de los contaminantes que se conoce de mayor interés por su aumento anual en las capitales del mundo, este se clasifica de acuerdo con el tamaño de la partícula en PM10 (material particulado con diámetro inferior a 10 micras) y PM2.5 (material particulado con diámetro inferior a 2.5 micras) (IDEAM, 2017). Cuando el diámetro de esta partícula es más pequeña, más peligrosa puede resultar ya que puede llegar a depositarse en el sistema respiratorio o en el torrente sanguíneo, asociando de esta manera los notables efectos en la salud que tiene este contaminante, otros contaminantes presentes en el aire son los gases como: dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y monóxido de carbono (CO), es así que estos gases junto al material particulado son considerados contaminantes

criterio, debido a su habitualidad y al daño que puede generar a la salud del ser humano (Wang et al., 2021)

Bioindicadores como monitores de la calidad del aire

El conocimiento de información de la calidad del aire en una zona determinada es un dato imprescindible para el diseño de la protección de la salud los seres vivos y de su hábitat. Conocer con qué fuentes, con qué sustancias y en qué medida se contamina una región es un estudio de suma importancia (Zhang et al., 2021)

La calidad del aire se puede evaluar mediante análisis de tipo químico y biológico, de allí se toman en cuenta los bioindicadores a evaluar que dependerán principalmente de la zona de estudio, los parámetros de la calidad del aire a evaluar y demás. Los bioindicadores son en este caso fundamentales para monitorizar el área de estudio que se encuentra afectada.

Entre los bioindicadores más comunes para evaluar la calidad del aire podemos encontrar comunidades microbianas, hongos, musgos, líquenes entre otros, estos son útiles para realizar la evaluación preliminar, monitorizar áreas afectadas y verificar las zonas donde se están haciendo esfuerzos de restauración atmosférica (Comess et al., 2021).

Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire

Los primeros inicios de los Bioindicadores con respecto a la calidad ambiental, se dan a finales del siglo XIX donde Nylander estudia la flora liquénica del Jardín de Luxemburgo (Paris,1866) (Mares Rueda, 2017) así mismo en los años 60 se han podido encontrar diversos estudios acerca de la biodiversidad de los líquenes que permitieron descubrir la sensibilidad de los mismos respecto a contaminantes atmosféricos tales como dióxido de azufre, ozono, dióxido

de nitrógeno entre otros, es por ello que son considerados una herramienta sumamente útil para evaluar la contaminación atmosférica.

Los líquenes son organismos que tienen una asociación simbiótica mutualista entre un alga verde o cianobacterias y un hongo. (Mares Rueda, 2017) además, se adaptan a cualquier tipo de corteza ya sea: árboles, rocas, suelo, entre otros. Estos se usan por lo general para evaluar la contaminación del aire ya que no poseen ni raíz ni cutícula y adquieren toda el agua y los nutrientes por exposición directa con la atmosfera, esto permite que tenga una gran superficie externa que les facilita tener una detección y acumulación más amplia y directa con los contaminantes, por ejemplo la niebla y el rocío en este caso son las mayores fuentes de agua para estos organismos estas poseen gran cantidad de contaminantes que a su vez serán tomados por los mismos líquenes ya que a medida que absorben nutrientes o agua también están tomando los contaminantes que desde un inicio vienen con los mismos.

Es importante recalcar que, si bien los líquenes son considerados organismos sensibles a la contaminación ambiental el nivel de sensibilidad depende del liquen y el contaminante que esté presente, ya que los patrones de distribución de las especies de líquenes son diferentes para cada comunidad respecto a su nivel de tolerancia al contaminante y demás, es esta diferencia en la sensibilidad la que se considera útil para interpretar los hallazgos en un estudio de evaluación de contaminación atmosférica (Fačkovcová et al., 2020).

Como consecuencia al nivel de sensibilidad de la especie de líquenes según se mencionaba anteriormente, dependiendo del grado de contaminación presente se puede dar la desaparición o cambio de color de los líquenes debido, por esta razón se valora la calidad del aire de una zona en particular mediante el índice de pureza atmosférica (IPA). Es importante mencionar que las fórmulas que se aplican para hallar este índice permiten determinar los niveles

de afectación de ocho contaminantes diferentes Como SO_2 , NO_2 , CO , Cd , Pb , Zn y polvo. Una de las contribuciones más importantes en los estudios con los líquenes a través del tiempo, fue el estudio de Cislighi y Nimis en 1997 donde comparaban el cáncer de pulmón con la contaminación atmosférica en Italia en la región de Véneto usando la variedad de líquenes presentes en esta área en ese entonces. Después de realizar los respectivos análisis concluyeron que el cáncer estaba relacionado con la cantidad de líquenes como resultado de la contaminación del aire con sus contaminantes más frecuentes (Mares Rueda, 2017).

Este proyecto de investigación se da a partir del líquen, considerándose como uno de los componentes de los ecosistemas más sensibles a los contaminantes atmosféricos (Dauphin et al., 2020). Existen diversos tipos de líquenes, entre ellos los líquenes epifitos. Un epifito, hace referencia al vegetal que crece sobre otra planta, usándola únicamente como soporte y sin necesidad de alimentarse de esta, sin generar ningún tipo de parasitismo o comensalismo sobre esta. Cuando se hace referencia a soporte se está hablando del forofito o planta hospedera, este es utilizado sólo como soporte sin recibir más daño que el que pueda provocar su abundancia dentro de su ramaje. (Root et al., 2021). Los líquenes son reconocidos Bioindicadores de la calidad del aire, estos bioindicadores son aquellos organismos, comunidades o especies que pueden dar información sobre los fenómenos que ocurren en el medio ambiente determinando cualitativamente los contaminantes ambientales generados de manera antrópica o naturales y así evaluar la calidad del aire a través del tiempo.

Metodología

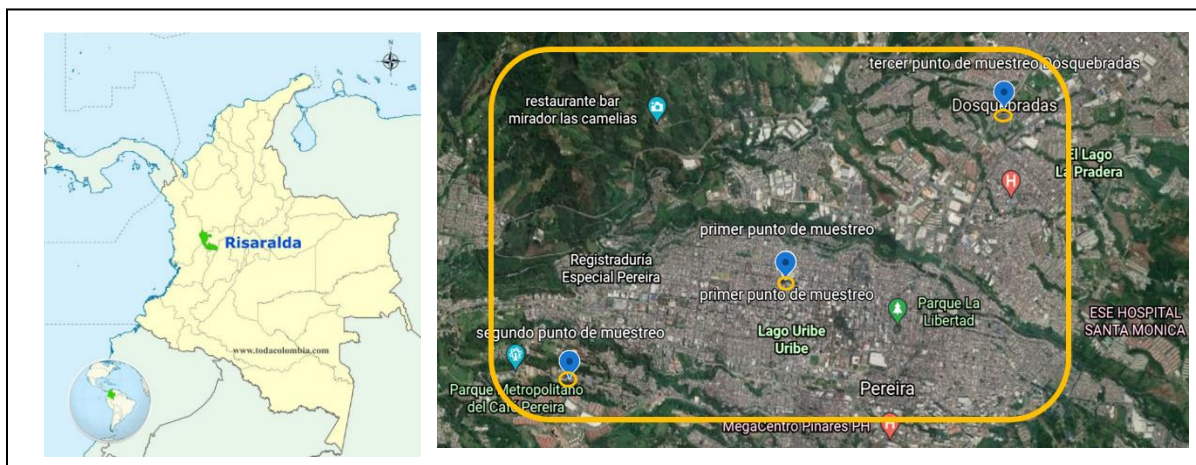
Este proyecto es de orden cuantitativo y cualitativo y su naturaleza se centra en la búsqueda de evidencias de niveles de contaminación por medio de estudios de casos específicos de zonas urbanas de los municipios de Pereira y Dosquebradas (Cienfuegos Velasco et al., 2016). La metodología propuesta se describe a continuación:

Zona de estudio

El área de estudio se localiza en los municipios de Pereira y Dosquebradas, ubicadas en la región centro-occidente del país como se puede apreciar en la figura 2.

Figura 2.

Mapa de área de estudio punto 1. Cra 4 entre las calles 25 y 26, punto 2. Av las Américas, punto 3. Calle 25 con cra 16 av ferrocarril Dosquebradas.



Fuente: Fuente: Google Earth. (2021)

Población zona de estudio. Población estimada de Pereira es de 431.784 (2018) habitantes y de Dosquebradas es de 206,693 (2019).

El clima de Pereira y Dosquebradas es templado – húmedo. El promedio de lluvia total anual es de 2301 mm. Durante el año las lluvias se distribuyen en dos temporadas secas y dos temporadas lluviosas. La humedad relativa del aire oscila durante el año entre 73 y 79% (IDEAM, 2021).

Selección de puntos de muestreo y toma de datos de las comunidades liquénicas

Para la selección de los puntos de muestreo se decidió trabajar con los sitios donde se encuentran ubicadas las estaciones de monitoreo de calidad de aire de la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), en el Área Metropolitana Centro Occidente de Colombia (AMCO).

El primer punto de muestreo se sitúa en la carrera 4 entre las calles 25 y 26; el punto dos se encuentra en la avenida Las Américas y el tercer punto se encuentra en Dosquebradas, avenida del Ferrocarril - Calle 25 con carrera.16. La zona testigo se localiza en la serranía alto del nudo el cual tiene jurisdicción en los municipios de Pereira, Dosquebradas, Santa Rosa y Marsella.

En el primer punto de muestreo como se observa en la figura 3 está instalado el equipo de medición de partículas menores de 10 micras (PM10), con sistema controlador de flujo volumétrico de alto volumen.

Figura 3.

Equipo PM10 Hospital Universitario San Jorge, Municipio de Pereira (4°49`4,37"N y 75°41`57,91"O)



Fuente: Elaboración propia

En la cuarta figura se muestra el equipo de medición de partículas menores de 2.5 micras con cilon selector de pm2.5 semiautomático partisol; que se encuentra instalado en la estación Pereira – Sede CARDER en la avenida las Américas.

Figura 4.

Equipo semiautomático PM 2.5 sede CARDER. Municipio de Pereira (4°48`24,84"N y 75°43`8,06"O)



Fuente: Elaboración propia

En la sede CARDER también se encuentra instalado el equipo termoeléctrico para medición de dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂); donde se emplea

específicamente para mediciones de SO₂ por el método de pararrosanilina, y para el Dióxido de Nitrógeno (NO₂) por el método de Arsenito de sodio. (CARDER, 2020).

Figura 5.

Set de vidriería Impingers del equipo Rac Termoeléctrico, Pereira.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.

Muestreador de tres gases trigas, sede CARDER Av las Americas.



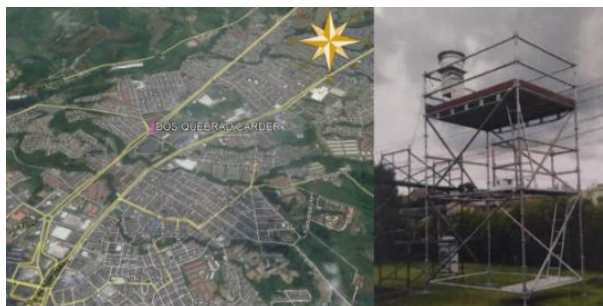
Fuente: Elaboración propia

La tercera estación se localiza en el sector urbano del municipio de Dosquebradas en las instalaciones de la industria POSTOBON. Se encuentra equipada con un equipo para la medición de PM₁₀. Este punto se caracteriza por ser un sitio de monitoreo con incidencia de fuentes

móviles, actividades industriales y concentración poblacional. Sector con población superior a 150.000 habitantes. (CARDER, 2020).

Figura 7.

Estación Balalaika Dosquebradas

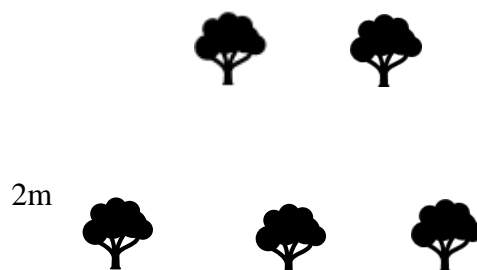


Fuente: Google Earth. (2021)

Se realizó el recorrido y observación en los tres puntos que se encuentran ubicadas las estaciones de monitoreo de calidad del aire, realizando el levantamiento de transectos de 100 x 2m (Figura 8), identificando varias especies de forófitos que se encuentran distribuido en los dos municipios, se seleccionaron cinco forófitos para el desarrollo del IPA. Además, se realizó el recorrido del lugar que no presenta indicios de contaminación (zona testigo), que en este caso fue la serranía del Alto del Nudo, inicialmente se realizó un inventario con los forófitos presentes en el espacio urbano de la ciudad de Pereira y Dosquebradas.

Figura 8.

Levantamiento esquemático de 2x100 m en cada zona evaluada 100m



Fuente: Elaboración propia

En la recopilación de datos para la selección del forófito se tubo cuenta los siguientes criterios:

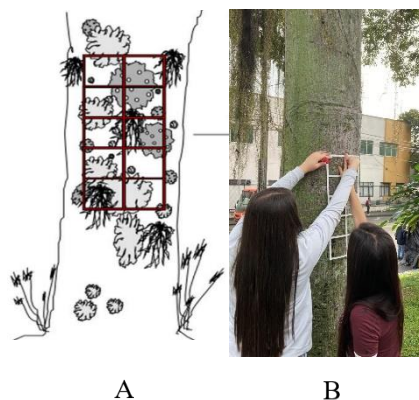
- Árboles adultos y sanos, con 70 cm de perímetro del tronco a la altura del pecho (DAP) y con una inclinación menor a 10°
- La corteza que se forma alrededor del tronco deber ser rugosa.
- Se excluirán para la toma de datos los árboles que presenten daños o que estén pintados.

Se realizó un registro de todas las especies que estuvieron presentes en cada uno de los cuadrantes, considerando que únicamente se trabajó con especies liquénicas que se pudieron percibir a simple vista o con la lupa de campo.

Se trabajó con una rejilla de relevamiento de líquenes, conformada por 10 recuadros (2x5 cuadrados), los recuadros de cada rejilla tendrán un área de 10x10 cm² aproximadamente entre una altura de 1,20 hasta 2 metros que es donde generalmente se ve más afectadas las personas por la contaminación del aire.

Figura 9.

Dibujo esquemático para la medición de cobertura de líquenes, B. Medición en campo



Fuente: Elaboración propia

Gran parte de la identificación de los especímenes se fundamentó en la guía de campo Santa María líquenes, hepáticas y musgos de la universidad Nacional de Colombia, del instituto de ciencias naturales (Laura V. Campos-S. - Jaime Uribe-M. - Jaime Aguirre-C, 2017), analizando así, la descripción morfológica característica como textura, color, longitud, entre otros.

Se tuvo en cuenta la información relacionada con los siguientes contaminantes: material particulado PM2.5, monóxido de carbono (CO) y el Ozono (O3) para los meses (Abril-Mayo 2022) la cual fue obtenida de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de la CARDER. Para los análisis de esta información empleamos una tabla de Excel donde se seleccionaron los valores promedios mensuales de cada contaminante con respecto al tiempo, para el material particulado PM2.5 se tomaron promedios diarios de 24 horas, mientras que para Ozono (O3) y monóxido de carbono (CO) se tomó el promedio diario de 8 horas.

Análisis de los datos:

En las cuatro zonas donde se realizó el monitoreo se aplicó la metodología para el análisis de datos cuantitativos, más conocido como “cartografía de líquenes a cada forofito seleccionado” según la norma VDI-3799 (1991), y adaptada por Nimis (1999), (Vargas et al., 2016)

- Parámetros medidos: para cada forofito se tuvo en cuenta la frecuencia que estos tenían en cada recuadro de la rejilla, también la cobertura y su abundancia se determinó por árbol.
- Mediciones de diversidad liquénica: es una combinación entre la abundancia de líquenes con la riqueza de especies donde se calculará por árbol y por sector donde se utilizará el índice de Shannon y Wiener (H). (Moreno, 2001), la fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$H' = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$$

Dónde:

H'=índice de Shannon y Wiener

pi = cobertura de la especie

i. pi es igual al área que ocupa cada especie en la gradilla de muestreo

n = número total de especies o riqueza por sector.

Para cada área muestreada, se usó el Índice de Pureza Atmosférica (IPA) propuesto por García & Rubiano (1984) y reformulado por Steubing & Fangmeier (1992), donde se basa en la

observación de la presencia o ausencia de especies sensibles o tolerantes, para denotar un nivel integral de calidad del aire y zonificar el área de estudio en diferentes niveles de contaminación (Canseco, Angela; Anze, Gary; Franken, 2006).

El índice de Pureza Atmosférica (IPA), se calculará a través de la siguiente formula:

$$IPA_j = \frac{1}{n} \sum (f_i * Q_i)$$

Dónde:

IPA_j = Índice de Pureza Atmosférica de la estación j

n = número total de forófitos muestreados en cada estación j

f_i = grado de frecuencia.

Q_i = factor de tolerancia/sensibilidad de la especie i

Para poder definir el Q_i se debe realizar la siguiente ecuación la cual determinará el número de especies i en las estaciones de monitoreo.

$$Q_i = \sum_j \frac{(A_j - 1)}{N_j}$$

Dónde:

Q_i = factor de resistencia de la especie i

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

N_j = número de estaciones (j) donde se encuentra la especie i

Resultados

Selección de puntos de muestreo y toma de datos de las comunidades liquénicas

A la hora de definir los puntos de muestreo se tuvieron en cuenta diferentes aspectos, los cuales permitieron seleccionar las zonas que son consideradas puntos estratégicos representativos con características óptimas y puntuales dentro del departamento de Risaralda con el fin de lograr cumplir con los objetivos anteriormente propuestos.

Para la selección de los puntos de muestreo se decidió trabajar con los sitios donde se encuentran ubicadas las estaciones de monitoreo de calidad de aire de la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), en el Área Metropolitana Centro Occidente de Colombia (AMCO).

Figura 10.

Zonas de Muestreo- Cuadrantes A,B,C,D.





Fuente: Elaboración propia

En el cuadrante A de la figura 1, podemos observar el primer punto de muestreo el cual se sitúa en la carrera 4 entre las calles 25 y 26 Pereira, esta zona es clasificada como residencial, con alto flujo vehicular la especie de forofito que predomina en este sector es conocido como Urapán.

El cuadrante B muestra la zona de muestreo ubicada en Dosquebradas Av ferrocarril, donde se muestrearon 5 forofitos, esta zona cuenta con alto flujo vehicular ya que es una avenida principal donde a diario circulan gran cantidad de fuentes móviles razón por la cual fue una de las zonas de muestreo seleccionada para realizar la investigación. El cuadrante C es la Av las Americas, ésta a pesar de ser una zona residencial no permanece tan expuesta como las anteriores al flujo vehicular. Sin embargo, es un punto concurrido por habitantes de la zona y a 200 metros de la zona de muestreo esta una vía principal de la ciudad de Pereira.

La zona testigo que se ve referenciada en el Cuadrante D fue escogida ya que es una zona verde alejada de las emisiones vehiculares permitiendo ser un punto de equilibrio ubicado en jurisdicción de los municipios de Pereira, Dosquebradas, Santa Rosa y Marsella. En las salidas de campo se pudieron apreciar temperaturas bajas (17°C), con tendencia de dominancia climática

húmeda donde se observaron variedades de líquenes como Ramalina farinacea y Usnea entre otras.

Dentro de cada fragmento de zona seleccionado se identificó el área más adecuada teniendo en cuenta los requisitos para la selección del forofito, dichos requisitos se encuentran estipulados en la metodología. A pesar de que todas las zonas se encontraban dentro de un mismo departamento, las condiciones de humedad, temperatura y flujo vehicular variaron a la hora de la toma por ello la diversidad de líquenes adquiridos fue de un alto nivel y diferentes características morfológicas.

Caracterización arbórea

Las funciones y servicios de los árboles van más allá de un papel meramente estético, puesto que ellos constituyen el recurso verde más valioso en las zonas urbanas, gracias a su longevidad, resistencia, capacidad fotosintética y de purificación del aire contribuyendo al mejoramiento de la calidad de vida del ser humano.

Se realizó la consulta de información bibliográfica sobre silvicultura urbana de Pereira, luego se realizó la primera visita de campo a los diferentes áreas de muestreo verificando la correlación entre las especies mencionadas y descritas en el manual de Silvicultura Urbana de Pereira (García Sierra, J.H., Ruiz Penagos, D. & Medina, N.E., Echeverry Duque, 2010).

En las áreas de muestreo se encontraron las siguientes especies Arbóreas:

Tabla 1*Especies arbóreas de la zona uno del muestreo*

Nombre común	Nombre científico	familia
Urapán	Fraxinus chinensis	Oleaceae
Acacia amarilla	Caesalpinia pluviosa	Fabaceae

Nota: Especies presentes en la Carrera cuarta con calles 25-26.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 1, encontramos dos tipos de especies introducidas, la familia Oleaceae son consideradas especies medicinales. Actualmente se encuentran escasos, razón por la cual son objeto de protección por parte de las autoridades ambientales. Son especies propias de regiones relativamente frías, buscan cumplir con funciones de regulación tanto de temperatura como paisaje.

Tabla 2*Especies arbóreas de la zona uno del muestreo.*

Nombre común	Nombre científico	Familia
Mulí	Buchenavia tetraphylla	combretaceae
Ébano	Caesalpinia ébano	Fabaceae
Búcaro cachimbo	Erythrina Fusca	fabaceae
	Loureiro	

Nota: Especies encontradas en. Av. Las Américas.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 2, encontramos a la familia Fabaceae, la cual fue de las especies arbóreas más encontradas en esta zona, entre estas se encuentran diferentes patrones de distribución y abundancia ya que varía según donde se encuentren situadas, además la constante destrucción de su hábitat natural les hace entrar en peligro de extinción.

Tabla 3

Especies arbóreas de la zona uno del muestreo.

Nombre común	Nombre científico	Familia
Casco de buey	Bauhinia variegata	Fabaceae
Caracoli, Aspavé	Anacardium excelsum	Anacardiaceae
Cedro de montaña	Cedrela montana	Meliaceae

Nota: Especies encontradas en Av Ferrocarril.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3 podemos observar las especies arbóreas de la zona 1 en la avenida ferrocarril, en la cual, se encontraron familias que están ampliamente distribuidas en trópicos, son especies flexibles al ambiente a la hora de habitar, originalmente pertenecen al tipo de clima subtropical. Se diferenciaron diferentes tipos de esta que permitían ser hospederos de diferentes líquenes que se lograron divisar al momento del muestreo.

Tabla 4.*Especies arbóreas de la zona uno del muestreo.*

Nombre común	Nombre científico	Familia
Carbonero zorro	Cojoba arborea	Fabaceae
Encenillo	Weinmannia pubescens	Cunoniaceae
Yarumo blanco	Cecropia telenitida	Urticaceae
Nogal	Cordia alliodora	Juglandáceas

Nota: Especies encontradas en Alto del nudo.

Fuente: Elaboración propia.

Las familias encontradas en la zona testigo son características de bosques montañosos húmedos, estos son uno de los ecosistemas más amenazados en Colombia a causa de la deforestación, agricultura y demás actividades que ponen en riesgo dichos ecosistemas. Se caracterizan por temperaturas bajas, estos forofitos fueron los menos intervenidos aparentemente en todo el estudio ya que se encontraban en un lugar aislado del flujo de personas y fuentes móviles.

Cartografía de líquenes



En el desarrollo del proyecto, se pudieron apreciar diferentes tipos de líquenes cuyo aspecto contaba con características específicas y de suma importancia a la hora de realizar un

análisis a simple vista, características tales como su forma, color, estructura y demás permitió identificar los 7 diferentes tipos de epífitos de manera inmediata.

En la presente tabla se pueden ver los líquenes encontrados, con el fin de realizar el respectivo conteo y análisis que nos permitirá finalmente evaluar la calidad del aire con base en lo encontrado en dichos organismos. Además, es importante mencionar el hecho de que los líquenes están principalmente influenciados por variables macro y micro ambientales afectando así su riqueza y abundancia, variables tales como las condiciones climatológicas presentado en el área que ayudan a definir la composición de la especie, o variables micro climáticas relacionadas con la estructura del bosque como la edad y el tipo de árbol o la cobertura del dosel, las que van a condicionar las comunidades (Medina et al., 2012).

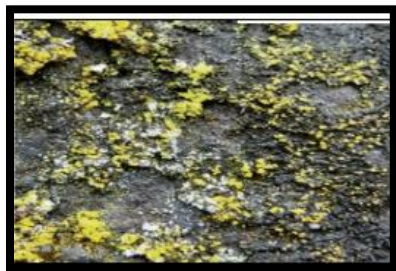
Tabla 5.

Cartografía de Líquenes

<i>Familia de liquen</i>	<i>Fotografía Liquen</i>	<i>Registro fotográfico, salida de campo</i>
Arthoniaceae		

Candelariaceae

ae



Usneaceae



Parmeliaceae



Pertusariaceae

e



Physciaceae**Graphidaceae**

Fuente: Elaboración propia

Conteo de Líquenes

Una vez seleccionados los forofitos para la toma de muestras se hizo uso de la rejilla con el fin de realizar el conteo de la cantidad de individuos por especie que fueron encontrados en cada cuadrante de esta, este procedimiento se realizó en cada árbol de las 4 zonas de estudio estipuladas para un total de 20 árboles muestreados. El conteo se basó en los tres biotipos principales y más comunes de líquenes epifitos cuyas principales características son:

Fruticuloso. Poseen talos con morfología de pequeños arbustos, en los que los lóbulos se estrechan y alargan profundamente de tal manera que se sujetan al sustrato por una mínima superficie. Su organización suele ser radiada, solo en ocasiones es dorsiventral. su morfología o ramificación de estos talos suele ser muy variada (Groot, 2018).

Foliáceo. Existe separación del talo con el sustrato, el liquen no se encuentra adherido al sustrato. con estructura heterómera córtex superior e inferior (Groot, 2018).

Crustáceo. Su tipo de talo siempre se encuentra en estrecho contacto con el sustrato, carece de córtex inferior o de órganos de sujeción y no se puede separar de el sin destruirlo. se sujeta al sustrato por medio de la medula o de un hipotalo (Groot, 2018).

Tabla 6.

Muestra de gradilla para conteo liquénico

A1	B1
A2	B2
A3	B3
A4	B4
A5	B5

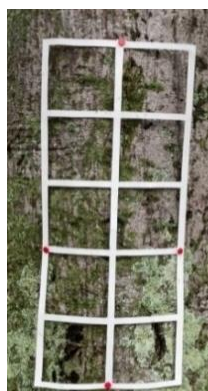
Fuente: Elaboración propia

El primer punto de muestreo se realizó en la carrera cuarta (4) entre las calles 25 y 26 del municipio de Pereira, esta zona está en el centro de la ciudad es considerablemente concurrida por fuentes móviles, se seleccionaron 5 forofitos los cuales presentaban las características antes descritas.

Tabla 7.*Árbol 1, Urapan (Zona 1)*

Especie de árbol:		Biotipo		
Urapán (Fraxinus uhdei)				
	Nombre de la especie	crust	foliac	frutic
Especie 1	Crustáceo verde claro	9		
Especie 2	Foliáceo verde oscuro		9	
	N° de especies: 2 IPA=			
	(cr+fl+fr) =18			

Fuente: Elaboración propia

Figura 11.

Fuente: Elaboración propia

El forofito seleccionado en esta zona es conocido como Urapán, se encontraron 2 biotipos de líquenes; biotipo 1 crustáceo Verde con detonaciones claras se presenta en 9 de los subcuadros (todos excepto en el A5), el biotipo 2 foliaceo verde oscuro posee talos foliáceos

verdosos que forman tapices grandes en las cortezas de los árboles, este se presenta en 9 de los subcuadros (todos excepto en el B1).

Flavoparmelia caperata. Es conocida por crecer principalmente en las cortezas acidas de los árboles, poco nitrofita lo que indica una preferencia por un hábitat rico en nitrato, la segunda especie **Candelaria concolor** posee talos foliáceos verdosos que forman tapices grandes en las cortezas de los árboles, este se presenta en 9 de los subcuadros (todos excepto en el B1).

Tabla 8.

Árbol 2 Urapan (Zona 1)

Especie de árbol		Biotipo		
Urapán (<i>Fraxinus uhdei</i>)				
	Nombre de la especie	crust	foliac	frutic
Especie	Crustaceo verde claro	8		
1				
Especie	Foliaceo verde oscuro		10	
2				
	N° de especies: 2 IPA=			
	(cr+fl+fr) =18			

Fuente: Elaboración propia

Figura 12.*Árbol 2 Urapan (Zona 1)*

Fuente: Elaboración propia.

En el Segundo Urapan muestreado, encontramos los mismos biotipos de líquenes que en el primero, igualmente que con las especies **Flavoparmelia caperata** y **Candelaria concolor**, sin embargo, Flavoparmelia a pesar de estar presente en casi todos los subcuadros (excepto B4 y A5) la encontramos en menor tamaño, uno muy diminuto a comparación del primer árbol muestreado.

Tabla 9.*Árbol 3 Acacia (Zona 1)*

Especie de árbol:	Biotipo		
Acacia amarilla (Caesalpinia pluviosa)			
Nombre de la especie	crust	foliac	frutic
Crustaceo verde claro	3		

Especie

1

Especie Foliaceo verde oscuro 10

2

N° de especies: 2 IPA=

(cr+fl+fr) =13

Fuente: Elaboración propia

Figura 13.

Árbol 3 Acacia (Zona 1)



Fuente: Elaboración propia

Teniendo como forofito a una Acacia amarilla, pudimos ver la **Physconia Grisasea** esta se caracteriza por ser poco nitrófito, es más frecuente en horquillas, ramas y grietas de árboles de corteza gruesa donde se acumula el polvo y sustancias nitrogenadas, fotófito, sensible a la contaminación por SO₂, y nuevamente aparece la **Candelaria concolor** presente en los 10 subcuadros de la rejilla.

Tabla 10.

Árbol 4 Urapan (Zona 1)

Especie de árbol:	Biotipo
Urapán (<i>Fraxinus uhdei</i>)	

	Nombre de la especie	crust	foliac	frutic
Especie	Crustaceo verde claro	10		
1				
Especie	Foliaceo verde oscuro		5	
2				
	N° de especies: 2 IPA=			
	(cr+fl+fr) =15			

Fuente: Elaboración propia

Figura 14.

Árbol 4 Urapan (Zona 1)



Fuente: Elaboración propia

En este árbol encontramos igualmente 2 tipos de liquen el **Hyperhyscia Adglutinada** presente en 5 de los subcuadros (A1 A2 B2 B3 B4), generalmente cortícola, es decir que se desarrolla sobre la corteza de los árboles o arbustos, muy nitrófito y medianamente fotófito. La especie **Flavoparmelia caperatta** que se presenta en 10 de los sub-cuadros.

Tabla 11.*Árbol 2 Acacia (Zona 1)*

Especie de árbol:		Biotipo		
Acacia amarilla (Caesalpinia pluviosa)				
	Nombre de la especie	crust	foliac	frutic
Especie 1	Crustaceo verde claro	10		
Especie 2	Foliaceo verde oscuro		4	
N° de especies: 2 IPA=				
(cr+fl+fr) =14				

Fuente: Elaboración propia

Figura 15.*Árbol 2 Acacia (Zona 1)*

Fuente: Elaboración propia

En este Acacia encontramos nuevamente a **Flavoparmelia caperata** presente en los 10 sub-cuadros y a **Candelaria concolor** esta vez solo presente en 4 de los sub-cuadros (B1 B2 A4 A5)

El segundo punto de muestreo se llevó a cabo en la avenida Las Américas calle 46 del municipio de Pereira, de igual manera se trabajaron con 5 forófitos de la zona.

Tabla 12.

Árbol 1 Muli Capacho (Zona 2)

Especie de árbol:		Biotipo		
Muli, Capacho (Buchenavia tetraphylla)				
	Nombre de la especie	crust	foliac	frutic
Especie 1	Crustáceo verde oscuro con apotecios negros	10		
Especie 2	Crustáceo gris claro	9		
N° de especies: 2 IPA=				
(cr+fl+fr) =19				

Fuente: Elaboración propia

Figura 16.*Árbol 1 Muli Capacho (Zona 2)*

Fuente: Elaboración propia

La primera especie arbórea de la zona sur responde al nombre de Muli más conocido como Capacho, entre sus características principales está su adaptación a una amplia variedad de suelos desde arenosos hasta arcillosos. En esta ocasión encontramos como especie líquénica **Candelaria concolor** esta especie crece sobre la corteza de árboles ricos en nutrientes (fresnos, chopos, arces), son aislados, podemos encontrarlos incluso en zonas urbanas y al lado de las carreteras. la Segunda especie **Physconia grisasea** es considerada una especie corticícola, en forma de roseta, muy adherida al sustrato, cubierto por isidios concentrados principalmente en la parte central del talo (Pereira & Bot, 2007).

Tabla 13.*Árbol 2 Ebano (Zona 2)*

Especie de árbol:		Biotipo	
Ebano (Caesalpinia ébano)			
Nombre de la especie	crustaceo	foliaceo	fruticuloso

Especie 1	Crustáceo verde oscuro	10
Especie 2	Foliáceo verde claro	5
Especie 3	Crustáceo gris con apotecios verde claro	7
	N° de especies: 2	
	IPA= (cr+fl+fr)=	
	22	

Fuente: Elaboración propia

Figura 17.

Árbol 2 Ebano (Zona 2)



Fuente: Elaboración propia

El Ebano es característico de zonas tropicales cálidas y húmedas del mundo, la primera especie encontrada es **lobothallia radiosa** la cual estuvo presente en las 10 sub-cuadrículas, la especie 2 es la **Candelaria concolor** presente en 5 de los espacios y por último tenemos a **Physconia grisasea** la cual se presenta en 7 de los sub-cuadros, (A1 A2 A3 A4 B4 A5 B5).

Tabla 14.*Árbol 3 Bucaro (Zona 2)*

Especie de árbol:		Biotipo		
Bucaro cachimbo (Erythrina Fusca)				
	Nombre de la especie	crustaceo	foliaceo	fruticuloso
Especie 1	Crustáceo verde claro	4		
Especie 2	Foliaceo verde claro		10	
N° de especies: 2 IPA=		(cr+fl+fr)= 14		

Fuente: Elaboración propia

El Aspecto principal del Búcaro es que, su tronco presenta tunas. Posee una altura máxima de 9 a 24 metros y su crecimiento medio se da en suelos pesados y de alta humedad, aquí encontramos 2 tipos de liquen; la Especie 1 **Candelaria Concolor** y la Especie 2 **lobothalia radiosa** presente en las 10 sub-cuadros.

Tabla 15.*Árbol 4 Ébano (Zona 2)*

Especie de árbol:		Biotipo		
Ebano (Caesalpinia ébano)				
	Nombre de la especie	crustaceo	foliaceo	fruticuloso

Especie Crustáceo gris claro 9

1

Especie Foliáceo verde claro 5

2

Especie Crustáceo verde 1

3

Nº de especies: 2 IPA=

(cr+fl+fr)= 15

Fuente: Elaboración propia

Figura 18.

Árbol 4 Ébano (Zona 2)



Fuente: Elaboración propia

En este árbol (Ebano), se pudieron encontrar 3 tipos de líquen, el 1 **Physconia grisasea** presente en 9 de los sub-cuadros, **Candelaria Concolor** presente en 5 de los sub-cuadros, (B1 B2 B3 A5 B5) y **Flavoparmelia Caperata** Presente en 1 sub-cuadros (A5).

Tabla 16.*Árbol 5 Ébano (Zona 2)*

Especie de árbol:		Biotipo		
Ébano (Caesalpinia ébano)				
	Nombre de la especie	crustaceo	foliaceo	fruticuloso
Especie 1	Crustáceo rosado claro	3		
Especie 2	Foliaceo verde claro		10	
Especie 3	Crustaceo gris con apotecios verde claro	9		
	N° de especies: 2			
	IPA= (cr+fl+fr)=			
	22			

Fuente: Elaboración propia

Figura 19.*Árbol 5 Ébano (Zona 2)*

Fuente: Elaboración propia

El ultimo forofito muestreado, es un Ébano, allí se encontraron 3 tipos de líquenes. El primero **lobothalia radiosa** presente en 3 sub-cuadros (B3 B4 B5) El Segundo **Physconia grisasea** presente en los 10 sub-cuadros de la rejilla y el tercer liquen **coniocarpon cinnabarinum** presente en 9 de los sub-cuadros (excepto en el A4).

El tercer punto de zona de muestreo se encuentra ubicado en Dosquebradas, en la Avenida del Ferrocarril - Calle 25 con carrera 16 este al igual que los demás se trabajó con 5 forofitos encontrados en la zona que cumplían con las características expuestas en la metodología, para el tercer punto de muestreo encontramos un total de 86 líquenes de 6 especies.

Tabla 17.*Árbol 1 Casco de buey (Zona 2)*

Especie de árbol:	Biotipo
Casco de buey (Bauhinia variegata)	

	Nombre de la especie	Crustaceo	Foliaceo	Fruticuloso
Especie 1	Crustáceo Verde claro	8		
Especie 2	Crustáceo gris claro	5		
	N° de especies: 2	13		
	IPA= (cr+fl+fr)=			
	13			

Fuente: Elaboración propia

Figura 20.

Árbol 1 Casco de buey (Zona 2)



Fuente: Elaboración propia

El casco de buey se caracteriza por poseer espinas en pares en las ramas, de origen en zonas tropicales y suelos húmedos. Se encontraron 2 tipos de liquen. El primero **Flavoparmelia Caperata** se presenta en 8 de los sub-cuadros. (excepto en B4 y B5) y el segundo **Physconia Grisasea** se presenta en 5 de los sub-cuadros, (B1 B2 A4 B4 B5).

Tabla 18.*Árbol 2 Caracoli, Aspavé (Zona 2)*

Especie de árbol:		Biotipo		
Caracoli, Aspavé (<i>Anacardium excelsum</i>)				
	Nombre de la especie	Crustaceo	Foliaceo	Fruticuloso
Especie 1	Crustáceo Gris claro	10		
	Nº de especies:	10		
	1 IPA= (cr+fl+fr)= 15			

Fuente: Elaboración propia

Figura 21.*Árbol 2 Caracoli, Aspavé (Zona 2)*

Fuente: Elaboración propia

El caracolí se considera una especie pionera ya que es un árbol de rápido crecimiento que puede mantenerse en un ecosistema por largo tiempo, lo que le convierte en una especie clave en procesos de sucesión ya que mantiene una constante oferta de recursos para la fauna de la zona y mejora las condiciones edáficas para el establecimiento de nuevas especies (Sanchez

Granados et al., 2007) En este se encontró 1 tipo de líquen **Physconia grisasea** en los 10 sub-cuadros de la rejilla.

Tabla 19.

Árbol 3 Cedro (Zona 2)

Especie de árbol:		Biotipo		
Cedro de montaña (Cedrela montana)				
	Nombre de la especie	Crustáceo	Foliáceo	Fruticuloso
1	Especie Crustáceo Gris claro	9		
2	Especie Crustáceo Verde	8		
3	Especie Fruticuloso Gris claro			4
	Nº de especies: 3 IPA= (cr+fl+fr)=	21		

Fuente: Elaboración propia

Figura 22.*Árbol 3 Cedro (Zona 2)*

Fuente: Elaboración propia

El cedro es considerado uno de los árboles ejemplares ya que su tronco es recto, grueso y posee una copa amplia perfecto para ser huésped de diferentes epifitos. En este caso se encontraron 3 tipos de Liquen. El 1 **Physconia grisasea** se presenta en 9 de los sub-cuadros. (Excepto en B2) la especie **Flavoparmelia Caperata** que se presenta en 8 de los sub-cuadros (Excepto en A5 y B5) y por último **lobothalia radiosa** la cual se presenta en 4 de los sub-cuadros (Solo en A1, B1, A2 y B

Tabla 20.*Árbol 4 Cedro (Zona 2)*

Especie de árbol:		Biotipo		
Cedro de montaña (Cedrela montana)				
	Nombre de la especie	Crustáceo	Foliáceo	Fruticuloso
Especie	Crustáceo Gris claro	9		

N° de especies: 1 IPA= 9

(cr+fl+fr)= 9

Fuente: Elaboración propia

Figura 23.

Árbol 4 Cedro (Zona 2)



Fuente: Elaboración propia

El cuarto forofito es un cedro, en el cual encontramos la especie de liquen **Physconia grisasea** el cual se presenta en 9 de los sub-cuadros. (Excepto en B3)

Tabla 21.

Especie de árbol:		Biotipo		
Cedro de montaña (Cedrela montana)				
	Nombre de la especie	Crustáceo	Foliáceo	Fruticuloso
Especie	Foliaceo Verde claro		10	

N° de especies: 1 IPA=

10

(cr+fl+fr)= 10

Fuente: Elaboración propia

Figura 24.



Fuente: Elaboración propia

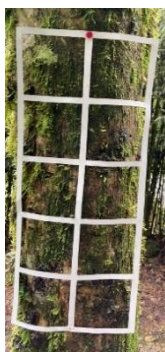
El último forofito de esta zona es un cedro, en el cual encontramos 1 liquen **Flavoparmelia Caperata** el cual se presenta en los 10 sub-cuadros.

El último punto de muestreo se realizó en el alto del nudo (zona testigo), este se encuentra a 2.000 (snm) allí es donde nacen los principales ríos y quebradas que surten de agua a Pereira y Dosquebradas este punto se escogió como la zona testigo ya que se encuentra completamente alejado de la población y las fuentes móviles y se considera puede ser una zona parcial para evaluar.

Tabla 22.*Árbol 1 Carbonero (Zona testigo)*

Especie de árbol:		Biotipo		
<i>Carbonero zorro (Cojoba arborea)</i>				
	Nombre de la especie	Crustáceo	Foliáceo	Fruticuloso
Especie	Fruticuloso Verde			4
1				
Especie	Foliaceo Verde claro		1	
2				
	N° de especies: 2 IPA=			
	(cr+fl+fr)=			

Fuente: Elaboración propia

Figura 25.*Árbol 1 Carbonero (Zona testigo)*

Fuente: Elaboración propia

El Carbonero Zorro es un árbol mediano que puede llegar a medir 15 metros de alto y desarrollar tronco único, corto y grueso de hasta un metro de diámetro. Su corteza es gruesa y con su copa amplia y extendida puede cubrir hasta 7 metros a la redonda en este encontramos 2 tipos de líquen, el primero **Flavoparmelia caperata** que se presenta en 4 de los sub-cuadros. (Excepto en B1, B2, B4, B5, A4 y A5) y el 2 **Candelaria concolor** el cual se presenta en solo 1 de los sub-cuadros (En B1)

Tabla 23.

Árbol 2 Encenillo (Zona testigo)

Especie de árbol:		Biotipo		
Encenillo (Weinmannia)				
	Nombre de la especie	Crustáceo	Foliáceo	Fruticuloso
1	Especie Fruticuloso Verde			9
2	Especie Fruticuloso Verde claro			1
	Nº de especies: 2 IPA=			10
	(cr+fl+fr)=			

Fuente: Elaboración propia

Figura 26.

Árbol 2 Encenillo (Zona testigo)



Fuente: Elaboración propia

En este caso con el Encenillo que es un Árbol de tamaño medio encontramos 2 tipos de líquen, la especie 1 **Candelaria concolor** que se presenta en 9 de los sub-cuadros. (Excepto en A5) y la especie 2 **Cladonia Subcervicornis** la cual se presenta en solo 1 de los sub-cuadros (en A1)

Tabla 24.

Árbol 3 Yarumo (Zona testigo)

Especie de árbol:		Biotipo		
<i>Yarumo blanco (Cecropia Telenitida)</i>				
	Nombre de la especie	Crustáceo	Foliáceo	Fruticuloso
Especie 1	Foliáceo verde claro		1	
Especie 2	Fruticuloso Verde			3

N° de especies: 2 IPA=

(cr+fl+fr)=

Fuente: Elaboración propia

Figura 27.

Árbol 3 Yarumo (Zona testigo)



Fuente: Elaboración propia

El yarumo blanco, es una especie que requiere de zonas húmedas para habitar de origen nativo con Diámetro de alrededor de 50 cm. En este tercer árbol de la zona testigos pudimos identificar 2 tipos de Líquen, el Primero **Cladonia Subcervicornis** el cual se presenta en 1 de los sub-cuadros. (Solo en B1) y el Segundo **Flavo pormelia caperata** el cual se presenta en 3 de los sub-cuadros (A1, A2 y A3)

Tabla 25.

Árbol 4 Nogal (Zona testigo)

Especie de árbol:	Biotipo		
<i>Nogal (Cordia alliodora)</i>	Crustáceo	Foliáceo	Fruticuloso
Nombre de la especie	Crustáceo	Foliáceo	Fruticuloso

Especie	Foliáceo verde claro	7
1		
Especie	Crustáceo Verde oscuro	7
2		
Especie	Fruticulososo Verde	3
3	claro	
	Nº de especies: 2 IPA=	
	(cr+fl+fr)=	

Fuente: Elaboración propia

Figura 28.

Árbol 4 Nogal (Zona testigo)



Fuente: Elaboración propia

El nogal es una especie distribuida por una gran cantidad de territorios, esta especie se cultiva principalmente por su tipo de madera, es un árbol de follaje caducifolio que puede llegar a alcanzar hasta 30 metros de altura. En este pudimos encontrar 3 tipos de liquen, como es la especie 1 **Candelaria concolor** la cual se presenta en 7 de los sub-cuadros. (Excepto en A2, B1 y B3) la Segunda **Cladonia Subcervicornis** que se presenta en 7 de los sub-cuadros (Excepto en A1, B1 y B2) y por último **Ramalina farinácea** la cual se presenta en 3 de los sub-cuadros (solo en A1, B1 y A2)

Tabla 26.*Árbol 5 Nogal (Zona testigo)*

Especie de árbol:		Biotipo		
	Nombre de la especie	Crustáceo	Foliáceo	Fructiculoso
1	Especie Crustaceo blancusco	10		
2	Especie Crustáceo Verde claro	6		
3	Especie Fructiculoso Amarillo			2
N° de especies: 2 IPA=				
(cr+fl+fr)=				

Fuente: Elaboración propia

Figura 29.*Árbol 5 Nogal (Zona testigo)*

Fuente: Elaboración propia

En el último forofito muestreado para la zona testigo se encontraron 3 tipos de líquen. El primero **Cladonia Subcervicornis** el cual se presenta en los 10 sub-cuadros, **Flavo pormelia caperata**, que está en 6 de los sub-cuadros (Excepto en A2, A5, B4 y B5) y **Candelaria concolor** que se presenta en 2 de los sub-cuadros (solo en A3 y A4).

Composición de la comunidad líquénica

Para las cuatro estaciones visitadas se registraron 10 especies de líquenes distribuidos en nueve familias (Tabla 27), Ramalina farinácea, Candelaria concolor, Usnea, Cladonia Subcervicornis, Flavo pormelia caperata, Hyperhyscia adglutinada, Physconia grisasea, lobothalia radiosa, Collema crispum, coniocarpon cinnabarinum (Tabla 5).

Tabla 27.

Listado de la composición de líquenes encontrados en las cuatro estaciones muestreadas.

Familia	especie	Estaciones		
		Cra 4 centro	Av Sur	D/das zona
		Zona testigo		
Cladoniaceae	Cladonia subcervicoris		x	x
collematecca	Collema crispum	x	x	
Arthoniaceae	coniocarpon		x	
Physciaceae	cinnabarinum		x x	
Physciaceae	Physconia grisasea	x		

Megasporaceae	Hyperhyscia			x	x
Usneaceae	adglutinada		x		x
Parmeliaceae	lobothalia radiosa			x	x
Ramalinaceae	usnea				x
Lecanoraceae	Flavo pormelia			x	x
	caperata				
	Ramalina farinácea	x			x
	candelaria concolor				
				x	x
		x			

Fuente: Elaboración propia

La familia Physciaceae presenta la mayor riqueza especies, seguida de la familia Lecanoraceae. La especie más frecuente, encontrada en todas las estaciones fue: candelaria concolor, seguida de Flavo pormelia caperata, Hyperhyscia adglutinada y Physconia grisasea.

Tabla 28.

Valores de riqueza (S), índice de diversidad Shannon-Weaver, índice de Simpson de las zonas estudiadas.

Índices	Cra 4 centro	Av Sur	D/das	Zona testigo
Shannon	1,4822	1,628286	1,535421	1,49857833

Simpson	4,2079	4,7369	4,3919	4,1527
---------	--------	--------	--------	--------

Fuente: Elaboración propia

El índice de Shannon-Wiener reveló que las estaciones en estudio están con un valor bajo de diversidad por tener un resultado menor a dos; con respecto a los resultados obtenidos con el cálculo del índice de Simpson, observamos que hay más diversidad de especies liquénicas en la zona de la Av Sur con respecto a las otras zonas evaluadas. El índice de Shannon revela que la zona testigo presentan valores de diversidad de especies relativamente baja. Aunque se ha demostrado de que como consecuencia de la contaminación atmosférica se produce una reducción y desaparición de los líquenes, también hay que estudiar más a fondo las especies que viven en esta zona ya que a pesar de que nos basamos en la diversidad liquénica, también se debe tener presente las especies más sensibles a los contaminantes especialmente por fuentes móviles.

En la zona testigo se registraron especies que son sensibles a contaminantes como PM 2.5, Ozono (O₃), la especie usnea de la familia usneaceae generalmente crece colgando de ramas de árboles, es un liquen con una característica particular, pues generalmente no crece en zonas donde se presente contaminación o en ambientes semiáridos.

Índice de pureza atmosférica (IPA)

El índice de pureza atmosférica presentó una variación en las estaciones de muestreo con un intervalo entre 458,32 y 500,47, siendo el valor más bajo el registrado en la zona testigo Alto del Nudo y el más alto en la Dosquebradas (Tabla 7). Los valores IPA fueron agrupados en los siguientes intervalos: contaminación máxima: IPA (289,73-331,88), contaminación alta: IPA

(331,88-374,03), contaminación moderada: IPA (374,03-416,17) contaminación baja (416,17-458,32), contaminación muy baja o sin contaminación: IPA (458,32-500,47).

Tabla 29.

Valores para el índice de pureza atmosférica (IPA) y cobertura para las estaciones muestreadas en Pereira y Dosquebradas, Colombia

Especie\Estación	Avenida Sur	Centro	Dosquebradas	Zona Testigo	$Q_i = \sum [(A_j - 1) / N_j]$
Candelaria	29	23		31	26,3
Concolor					33
Cladonia				34	30,0
Subcervicornis					00
Collema Crispum		17	12		12,5
					00
coniocarpon	3				-
cinnabarinum					1,000
Flavo pormelia				9	5,00
caperata					0
Flavoparmelia	8	19	8		10,3
Caperata					33
Hyperhyscia	21	23	18		19,3
Adglutinada					33
lobothalia radiosa	21		24		20,5
					00

Physconia Grisasea	24	3	24		15,6
				67	
Ramalina farinacea				12	8,00
				0	
Usnea				25	21,0
				00	
n (Forofitos)	5	5	5	5	
IPA	411,	301,	289,7	500,	
	17	23	3	47	
Nivel de	Moderado	Maximo	Maximo	Muy bajo	

contaminacion

Nota: Co = Cobertura, $Diversidad$ = Shannon-Wiener, Qi = Factor de resistencia de la especie i , Fi =Grado de frecuencia.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30.

Estaciones de muestreo clasificadas en zonas de contaminación

Categorización de IPA		
Nivel de contaminación	L-Inf	L-Sup
Maximo	289,73	331,88
Alto	331,88	374,03
Moderado	374,03	416,17
Bajo	416,17	458,32
Muy Bajo	458,32	500,47

Fuente: Elaboración propia

Los niveles de la calidad del aire en las estaciones escogidas oscilan entre las siguientes categorías: contaminación alta, contaminación moderada y contaminación muy baja (Tabla 31).

Tabla 31.

Estaciones de muestreo clasificadas en zonas de contaminación.

Estación de muestreo	IPA	Zona de contaminación
Cra 4 centro	301,23	máximo
Calle 25 con cra 16 av ferrocarril	289,73	máxima
Av Sur	411,17	moderada
Zona testigo Alto nudo	500,47	muy bajo

Fuente: Elaboración propia

Las dos primeras zonas (Cra 4 entre 25 y 26 y Calle 25 con cra 16 av ferrocarril) están cerca de las vías de alto tráfico, cuenta con pocas áreas verdes, lo que ocasiona que con el tiempo se conviertan en áreas desérticas de líquenes con IPA bajos, se caracterizan por presentar la menor diversidad liquénica con resultados poco favorables en cuanto al índice de calidad del aire, la estación de la Av sur se caracterizó por presentar mayor diversidad liquénica comparada con las otras estaciones, su IPA es moderado, en cuanto a la zona testigo Alto del Nudo presente un IPA relativamente muy bajo, indicándonos que su área se encuentra libre de contaminantes atmosféricos que afectan a los bioindicadores como el líquen, además de presentar el nivel más

bajo también cuenta con las especies más sensibles como la usnea sensible al PM 2.5 y al ozono O₃, la Cladonia Subcervicornis se ha comprobado que es un buen bioindicador ya que no crece en ambientes con altas concentraciones de nitrógeno. La determinación de ambientes contaminados por nitrógeno con bioindicadores es un método complicado, ya que muchas veces, el nitrógeno hace prosperar de manera rápida y eficaz el crecimiento de muchas especies de plantas y líquenes.

Categorización de las zonas a partir de los contaminantes atmosféricos:

En la Tabla 10 se muestran los datos de los contaminantes presentes en forma de partículas, incluido el PM_{2.5} (material particulado, cuyo diámetro es inferior a 2.5 µm) y otros compuestos químicos como el Ozono (O₃) y el monóxido de carbono (CO), según datos recolectados la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de la CARDER. para los meses de abril y mayo 2022. Para determinar la calidad del aire en las zonas donde se realizó el presente estudio.

Tabla 32.

Concentraciones promedio de PM_{2.5}, Ozono (O₃) y Monóxido de Carbono (CO)

Estaciones	PM 2.5		Ozono µg/m ³		M. Carbono µg/m ³	
	µg/m ³					
	Abril	Mayo	Abril	Mayo	Abril	Mayo
Centro	10.62	10,70µg/	43,38	43,55	224,94µg/	225,14µg/
	µg/m ³	m ³	µg/m ³	µg/m ³	m ³	m ³
Av Sur	10.48	10,45µg/	50,74	50,38	219,10µg/	222,33µg/
	µg/m ³	m ³	µg/m ³	µg/m ³	m ³	m ³

Av Ferrocarril D/das	10.55µg/ m3	10,60µg/ m3	44,24µg/ m3	43,35 µg/m3	220,94µg/ m3	221,63µg/ m3
Límite permisible	37		100		5000	
	(µg/m3)					

Nota: Estos datos fueron tomados en los meses de abril y mayo del 2022.

Fuente: elaboración propia.

En la (tabla 32) se puede observar las concentraciones mensuales promedio de PM2.5, O3 y CO para los meses de abril y mayo de 2022, datos recolectados en las estaciones ubicadas de calidad del aire de la CARDER. En este periodo no fue superado el nivel máximo permisible de estos contaminantes (37, 100 y 5000 µg/m3 respectivamente), resultado que es clasificado como favorable para la comunidad, sin embargo, según los resultados arrojados por el IPA presentan una baja diversidad de líquenes para estos periodos en la zona del centro y en la av ferrocarril de Dosquebradas.

Discusión

Al analizar cada estación del estudio se encontró que los porcentajes más altos en los resultados de la riqueza de especies se registró en la estación de la Av sur esto puede suceder ya que en la zona de muestreo se encuentra una reserva forestal y el área estudiado está a 200 metros de la vía principal, por otro lado, la estación con valores más bajos fue la Av. ferrocarril de Dosquebradas, la cual posee un alto flujo de vehículos; esta zona es afectada además por los contaminantes atmosféricos provenientes de las zonas industriales ya que este municipio se caracteriza por ser una zona industrial. En las cuatro zonas estudiadas todas presentaron ciertas diferencias en la composición liquénica. En la zona urbana la comunidad de líquenes (Cra 4 calle 25-26, Av. ferrocarril y Av. sur) generalmente están compuestas de especies que toleran ciertos tipos de contaminantes atmosféricos. En las áreas tomadas para el estudio, las familias de líquenes que predominan principalmente es Physciaceae esta especie suele beneficiarse con el aumento de algunos contaminantes atmosféricos como el nitrógeno, esto nos lleva a explicar su alta presencia en las zonas urbanas, La especie más frecuente, hallada en todas las estaciones fue: candelaria concolor la cual se encuentra tanto en las zonas urbanas como en la rurales es una especie que se considera tolerante a la contaminación ambiental (Valois Cuesta & Mosquera Palacios, 2014).

El índice de Shannon-Wiener revela que las estaciones de la Cra 4 del centro y Av. Ferrocarril Dosquebradas presentan valores de diversidad de especies relativamente baja. Esto se da como consecuencia de la contaminación atmosférica produciendo una reducción o desaparición de los líquenes en un lugar específico.

Según el índice de calidad del aire (ICA), los sitios donde se realizó el muestreo se clasifican como “zonas con buena calidad del aire” (evaluación de contaminantes como PM2.5, Ozono (O3) y monóxido de carbono (CO)), al contrario con los resultados del IPA estas zonas

clasifican como zonas contaminadas o con contaminación moderada, la categorización que hace la Corporación Autónoma del Risaralda (CARDER) con el Índice de Pureza Atmosférica (IPA) calculado en este estudio, no se encontró el mismo patrón. La estación de la Av ferrocarril de Dosquebradas arroja un resultado con un mayor potencial para la acumulación de contaminantes atmosféricos a lo largo del año y se caracteriza como un área con vegetación escasa y flujo intenso de vehículos.

Se puede inferir que contaminantes como el material particulado (MP) tiene una importante influencia negativa en la distribución de los líquenes en zonas urbanas, como lo mencionábamos en la problemática, la variación y alteración en las comunidades liquénicas en los sitios de estudio son indicativos de que ciertas zonas de los dos municipios están siendo afectadas por factores como el crecimiento demográfico y el aumento del flujo vehicular.

Conclusiones

Con este trabajo se evidencia la necesidad de trabajar mediante recursos de control y biomonitoreo para determinar el índice de pureza atmosférica, en zonas donde no se puede tener una estación de monitoreo.

Se puede evidenciar la importancia de los espacios verdes en las zonas urbanas, si bien es cierto existe una relación directa entre la cantidad de espacios verdes y la diversidad líquénica, como también se evidencia como influye la contaminación atmosférica presente en el espacio urbano sobre las variables ecológicas estudiadas en las comunidades líquénicas, aceptando que solo permanezcan aquellas especies que logran adaptasen a los cambios negativos.

Recomendaciones

Se recomienda realizar el estudio del IPA y el índice de SHANON WIENER de manera periódica (1 vez al mes) con el fin de obtener información actualizada del estado de la calidad del aire en ambas ciudades y el comportamiento de los contaminantes evaluados por medio de los líquenes. Buscando que la información para las zonas de muestreo planteadas permanezca actualizada y así su Analizar el comportamiento por medio de lo que nos muestre el bioindicador.

Se recomienda Ampliar la cobertura de las zonas de estudio con el fin de analizar a mayor escala la calidad del aire en zonas que no se pudieron tener en cuenta y así realizar una comparación de los datos obtenidos en las diferentes áreas, los cuales variarán dependiendo de la ubicación de la zona de estudio y la congestión vehicular que se presente allí permitirá determinar el comportamiento de los contaminantes de manera más puntual.

Se recomienda una evaluación más detallada del comportamiento de los líquenes para esto es importante tener conocimiento de las especies por lo que es una buena idea Construir un Inventario de líquenes buscando identificar desde las especies más sensibles hasta las más tolerantes frente a las concentraciones de contaminantes presentes en el aire.

Referencias bibliográficas

- Abhijith, K. V., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., Broderick, B., Di Sabatino, S., y Pulvirenti, B. (2017). Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review. *Atmospheric Environment*, 162, 71–86.
<https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2017.05.014>
- CARDER. (2020). Lineamientos para la operación del sistema de vigilancia de la calidad del aire. file:///C:/Users/jmelchor/Desktop/Angela Margit/b - copia/LINEAMIENTOS DE OPERACIÓN - V9 21-02-2020.pdf
- Cienfuegos Velasco, M. de los A., Cienfuegos Velasco, A., Cienfuegos Velasco, M. de los A., y Cienfuegos Velasco, A. (2016). Lo cuantitativo y cualitativo en la investigación. Un apoyo a su enseñanza. *RIDE. Revista Iberoamericana Para La Investigación y El Desarrollo Educativo*, 7(13), 15–36.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-74672016000200015&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Comess, S., Donovan, G., Gatziolis, D., y Deziel, N. C. (2021). Exposure to atmospheric metals using moss bioindicators and neonatal health outcomes in Portland, Oregon. *Environmental Pollution*, 284, 117343. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.117343>
- Cuesta Santos, O., Perez Sosa, C., Iraola Ramirez, C., y Gonzales Jaime, Y. (2017). National inventory of atmospheric emissions of main stationary sources. *Revista Cubana de Meteorología*, 23(Atmospheric emissions), 13.

Dauphin, C. E., Durand, A., Lubonis, K., Wortham, H., y Dron, J. (2020). Quantification of monosaccharide anhydrides by gas chromatography/mass spectrometry in lichen samples. *Journal of Chromatography A*, 1612, 460675.

<https://doi.org/10.1016/J.CHROMA.2019.460675>

Fačkovcová, Z., Vannini, A., Monaci, F., Grattacaso, M., Paoli, L., y Loppi, S. (2020). Effects of wood distillate (pyroligneous acid) on sensitive bioindicators (lichen and moss). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 204, 111117.

<https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2020.111117>

IDEAM. (2019). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2018*.

http://www.andi.com.co/Uploads/Informe_estado_calidad_del_aire_2018.pdf?cv=1.

IDEAM. (2021). Informe estado calidad del aire en IDEAM 2020. *Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos*.

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894>

Inca, J., y Segura Briones, S. V. (2013). Caracterización de la contaminación atmosférica en seis parques recreacionales del Distrito Metropolitano de Quito mediante el uso de bioindicadores. *107*.

Jovan, S., y Mccune, B. (2005). Air-quality bioindication in the greater central valley of California, with epiphytic macrolichen communities. *Ecological Applications*, 15(5), 1712–1726.

Lee, G. eun, y Lee, J. H. (2021). Spatial correlation analysis using the indicators of the anthropocene focusing on atmospheric pollution: A case study of Seoul. *Ecological Indicators*, 125, 107535. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.107535>

Lin, Y. C., Li, Y. C., Amesho, K. T. T., Shangdiar, S., Chou, F. C., y Cheng, P. C. (2020).

Chemical characterization of PM_{2.5} emissions and atmospheric metallic element concentrations in PM_{2.5} emitted from mobile source gasoline-fueled vehicles. *Science of The Total Environment*, 739, 139942.

<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139942>.

Lijteroff, R.; Lima, L., y Prieri, B. (2009). Uso de líquenes como bioindicadores de

contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 5(2), 111–120.

Mares Rueda, I. (2017). *Líquenes como bioindicadores de calidad del aire* (Trabajo fin de grado, Universidad Complutense). Repositorio Institucional Universidad Complutense, Facultad de Farmacia.

<https://eprints.ucm.es/id/eprint/54779/1/IRENE%20MARES%20RUEDA.pdf>

Nimis, P. L., Lazzarin, G., y Aro, D. G. (1991). Lichens as bioindicators of air pollution SO₂ in the Veneto region (ne Italy). *STUDIA GEOBOTANICA*, 11, 3-76.

https://www.openstarts.units.it/bitstream/10077/15174/1/NIMIS_LAZZARIN_GASPAR_O_3-76.pdf

Olaya, L. J. R., y Valencia, M. L. C. De. (2006). Delimitación de áreas de isocontaminación atmosférica en el campus de la Universidad Nacional de Colombia mediante el análisis de bioindicadores (líquenes epifitos). *Acta Biológica Colombiana*, 11(2), 87–102.

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/63326>

Pérez Cárdenas, J. E. (2017). La calidad del aire en Colombia: un problema de salud pública, un problema de todos. *Revista Biosalud*, 16(2), 5-6.

- Root, H. T., Jovan, S., Fenn, M., Amacher, M., Hall, J., y Shaw, J. D. (2021). Lichen bioindicators of nitrogen and sulfur deposition in dry forests of Utah and New Mexico, USA. *Ecological Indicators*, 127, 107727.
<https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.107727>
- Sanchez Granados, D., Lopez Rios, F., y Hernandez Garcia, A. (2007). Ecología de las plantas Epifitas. 12.
- Stamenković, S., Cvijan, M., y Arandjelović, M. (2010). Lichens as bioindicators of air quality in Dimitrovgrad (South-Eastern Serbia). *Archives of Biological Sciences*, 62(3), 643–648.
<https://doi.org/10.2298/ABS1003643S>
- Ubilla, C., y Yohannessen, K. (2017). Contaminación atmosférica efectos en la salud respiratoria en el niño. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28(1), 111–118.
<https://doi.org/10.1016/J.RMCLC.2016.12.003>
- Valois Cuesta, H., y Mosquera Palacios, Y. (2014). Lichens as bioindicators of air quality in Quibdó city, Chocó, Colombia. *Revista Biodiversidad Neotropical*.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18636/bioneotropical.v4i1.178>
- Vargas, N. G., Pérez, M. L., Sánchez, G. N., y Mercado, R. (2016). Aplicabilidad de líquenes bioindicadores como herramienta de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Cochabamba. *Undefined*.
- Wei, P., Brimblecombe, P., Yang, F., Anand, A., Xing, Y., Sun, L., Sun, Y., Chu, M., y Ning, Z. (2021). Determination of local traffic emission and non-local background source contribution to on-road air pollution using fixed-route mobile air sensor network. *Environmental Pollution*, 290, 118055. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.118055>

Zárate-Arias, S., Moreno-Palacios, M., y Torres-Benítez, A. (2019). Diversidad, especificidad de forófito y preferencias microambientales de líquenes cortícolas de un bosque subandino en la región Centro de Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(169). <https://doi.org/10.18257/raccefyn.886>