

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS LÍQUENES COMO BIOINDICADORES DE
LA CALIDAD DEL AIRE DEL KILÓMETRO 3 AL 4 DE LA VÍA VILLAVICENCIO
– ACACIAS



CRISTIAN DUVAN CARRERO MATEUS
THALÍA GERALDYNE RODRÍGUEZ GUEVARA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO
2019

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS LÍQUENES COMO BIOINDICADORES DE
LA CALIDAD DEL AIRE DEL KILÓMETRO 3 AL 4 DE LA VÍA VILLAVICENCIO –
ACACIAS

CRISTIAN DUVAN CARRERO MATEUS
THALÍA GERALDYNE RODRÍGUEZ GUEVARA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero(a) Ambiental

Asesor
JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO
Ingeniero Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO
2019

Autoridades Académicas

P. José Gabriel MESA ANGULO, O. P.
Rector General

P. Eduardo GONZÁLEZ GIL, O. P.
Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.
Rector Sede Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.
Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN
Secretaria de División Sede Villavicencio

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN
Decana Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota De Aceptación

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de Facultad

JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO

Director Trabajo de Grado

ANGELA MARIA ZAPATA MARIN

Jurado

CESAR AUGUSTO RIVEROS ROMERO

Jurado

Villavicencio, Agosto, 2019

Dedicatoria

El presente trabajo se lo dedico en primer lugar a Dios por brindarme la fuerza para continuar día a día con mis estudios y no darme por vencido, para cumplir con mis propósitos y lograr este objetivo.

A mis padres, Rubiela Mateus y Julio Carrero quienes con su apoyo incondicional, y esfuerzo lograron brindarme la oportunidad para que continuará con este propósito. Por ofrecerme la confianza, el amor y la compañía para lograr mis sueños, gracias a ellos que fueron los pioneros en ayudarme con este objetivo.

A mi compañera de trabajo de grado quien siempre mostro su dedicación y su esfuerzo para que termináramos este documento, además brindo todo su conocimiento y entrega, con la mejor disposición, hasta que culmináramos con nuestro sueño, de quien aprendí muchas cosas profesionalmente.

A mis compañeros que fueron las personas que cada día me ayudaban e impulsaban a crecer, a aquellos compañeros con los cuales inicie este propósito y partieron de este mundo terrenal, a los docentes quienes me brindaron todo su conocimiento para formarme como un buen profesional.

En memoria de mi amiga Jeniffer Xilena Huertas Hernández de quien aprendí a hacer las cosas con amor y entrega para ser felices que me enseñó a persistir por nuestros sueños.

Cristian Duvan Carrero Mateus

Dedicatoria

A Dios dedico la dicha y emoción que siento al dar por finalizada esta etapa de mi vida, por brindarme siempre esa fuerza, entendimiento y sabiduría necesaria durante el camino que hoy me trae a la meta.

A mis padres Clara Guevara y Ovidio Rodríguez por nunca dejar de creer en mí y apoyarme siempre, por todas las palabras de aliento que me regalaron cada vez que el camino se tornaba difícil, por todo el amor, la confianza y la comprensión brindada; porque siempre han sido mi más grande motivo para salir adelante, hoy con gran alegría entrego este trabajo, fruto de todo aquello por lo que luchamos juntos a lo largo de estos 5 años.

A mis hermanas Lunia Cárdenas y Dayana Rodríguez porque son parte de mi motor, sin ustedes nada de esto habría sido posible, sus consejos y reproches hicieron de mi la mujer que soy hoy día y gracias a eso he aprendido que para triunfar en la vida solo se necesita de ganas.

A mi familia, amigos, maestros y todas aquellas personas que me brindaron su apoyo, aliento y me compartieron su conocimiento para alcanzar este objetivo.

Y por supuesto, a mi compañero Cristian Carrero, por ser el mejor del mundo mundial, por obsequiarme su valiosa amistad, por el excelente equipo que formamos, por permitirme aprender de sus habilidades y compartir su conocimiento conmigo, por toda su dedicación y entrega total durante la elaboración de la presente investigación, pues como fruto de nuestro esfuerzo y compromiso, hoy alcanzamos este pequeño gran sueño.

Thalía Geraldine Rodríguez Guevara

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por permitirnos alcanzar esta meta y brindarnos todo aquello que nos condujo hasta este punto, porque nunca nos permitió desfallecer y nos llenó siempre de fé y esperanza, demostrándonos que su voluntad es más grande que cualquier obstáculo por difícil que parezca.

A nuestras familias Carrero Mateus y Rodriguez Guevara, agradecemos plenamente por la confianza brindada y por el apoyo incondicional ofrecido con cada uno de nosotros, por darnos la oportunidad de luchar por nuestros sueños, agradecemos inmensamente que fueran y sean nuestro motor que nos dio las fuerzas para poder cumplir con nuestro propósito y vencer las adversidades presentadas en el camino; gracias a ustedes, logramos dar cada paso hasta llegar a la meta.

Este trabajo es el fruto de un esfuerzo colectivo y un reto, en el cual cada uno dejó en su camino grandes aprendizajes. Por esta razón agradecemos a nuestro director Jair Esteban Burgos Contento, por compartir con nosotros cada uno de sus conocimientos, por la ayuda brindada, las enseñanzas, su acompañamiento y su compromiso con este trabajo.

A la docente Verónica Duque Pardo quien desde un principio nos aportó con su conocimiento, sus ideas y su profesionalismo para que lográramos nuestros propósitos.

A todas aquellas personas que nos expresaron sus ideas y conocimientos a lo largo de nuestros años de estudios, compañeros que nos brindaron su mano y permitieron que día a día creciéramos profesionalmente.

Este logro fue el propósito planteado inicialmente y ha sido posible gracias a todos aquellos que nos regalaron esos momentos de alegría, los cuales aportaron significativamente a que lográramos la culminación de nuestro proyecto y gozáramos de dicha y alegría por culminar esta etapa.

Tabla de contenido

1. Introducción	16
2. Planteamiento del problema.....	17
2.1. Formulación en torno al problema	18
2.1.1. Hipótesis nula: Los líquenes son deficientes bioindicadores de la calidad del aire en el kilómetro 3 al 4 de la vía Villavicencio – Acacias.	18
2.1.2. Hipótesis alternativa: Los líquenes tienen una alta eficiencia como bioindicadores de la calidad del aire en el kilómetro 3 al 4 de la vía Villavicencio - Acacias.	18
3. Objetivos.....	19
3.1. Objetivo General	19
3.2. Objetivos Específicos.....	19
4. Justificación.....	20
5. Alcance	22
6. Marco de Referencia	24
6.1. Marco Teórico	24
6.2. Marco Conceptual	25
6.3. Marco Legal	29
7. Metodología	30
7.1. Fase I. Identificación de líquenes en el área de estudio y cálculo del IPA	30
7.1.1. Selección de los árboles	30
7.1.2. Monitoreo de líquenes.....	31
7.1.3. Conteo de frecuencia de cada biotipo de liquen y cobertura liquénica.....	32
7.1.4. Cálculo del IPA.....	32
7.2. Fase II: Estimación de zonas con mayor carga de contaminantes	33
7.2.1. Solicitud de información.....	33
7.2.2. Construcción de la rosa de vientos.....	33

7.2.3.	Dispersión de contaminantes	34
7.3.	Fase III: Análisis de la correlación entre el IPA obtenido y los registros de concentración de contaminantes de la estación de calidad del aire.....	34
7.3.1.	Correlación por Pearson.....	34
8.	Resultados	36
8.1.	Fase I. Identificación de líquenes en el área de estudio y cálculo del IPA.	36
8.1.1.	Selección de los árboles	36
8.1.2.	Monitoreo de líquenes.....	38
8.1.3.	Conteo de frecuencia de cada biotipo de liquen y cobertura liquénica.....	39
8.1.4.	Cálculo del IPA.....	41
8.2.	Fase II: Estimación de zonas con mayor carga de contaminantes	43
8.2.1.	Solicitud de información.....	43
8.2.2.	Construcción de la rosa de vientos.....	44
8.2.3.	Dispersión de contaminantes	45
8.3.	Fase III: Análisis de la correlación entre el IPA obtenido y los registros de concentración de contaminantes de la estación de calidad del aire.....	48
8.3.1.	Correlación por Pearson:.....	48
9.	Discusión	51
9.1.	Fase I: Identificación de líquenes en el área de estudio y cálculo del IPA	51
9.1.1.	Selección de los árboles:.....	51
9.1.2.	Conteo de frecuencia de cada biotipo de liquen y cobertura liquénica.....	51
9.2.	Fase II: Estimación de zonas con mayor carga de contaminantes	53
9.2.1.	Solicitud de información.....	53
9.2.2.	Construcción de la rosa de vientos.....	54
9.2.3.	Dispersión de contaminantes	54
9.3.	Fase III: Análisis de la correlación entre el IPA obtenido y los registros de concentración de contaminantes de la estación de calidad del aire.....	55

9.3.1. Correlación por Pearson:.....	55
8. Conclusiones	57
9. Recomendaciones	59
10. Referencias bibliográficas	60

Lista de tablas

Tabla 1: Normatividad legal que aplica para el proyecto	29
Tabla 2: Valores de pH de la corteza de árboles a analizar	38
Tabla 3: Biotipos de líquenes hallados	38
Tabla 4: Análisis estadístico de las concentraciones de PM10 Y O3 en el aire durante las fechas de monitoreos	44
Tabla 5: Clasificación del coeficiente de correlación de Pearson.....	48
Tabla 6: Resultados de la correlación entre el IPA por biotipo y los contaminantes	49

Lista de Figuras

Figura 1: Área de estudio.....	22
Figura 2: Ilustración gráfica de la ubicación de la rejilla sobre el tronco del árbol.....	31
Figura 3: Ubicación espacial de los árboles seleccionados en el área de estudio.....	37
Figura 4: Conteo de frecuencia de cada biotipo de liquen.....	39
Figura 5: Porcentaje (%) de cobertura liquénica por biotipo.....	40
Figura 6: IPA promedio por biotipo de liquen.....	40
Figura 7: Comportamiento del IPA por biotipo durante el monitoreo.....	40
Figura 8: Concentración de los contaminantes durante el periodo de monitoreo.....	42
Figura 9: Rosa de vientos, hacia donde se dirigen los vientos.....	43
Figura 10: Dispersión del PM ₁₀ en el espacio.....	44
Figura 11: Dispersión del PM ₁₀ en el espacio a través del tiempo	45
Figura 12: Elevación de los contaminantes	46

Lista de Apéndice

Figura 1: Área de estudio (Cristian Carrero, 2019).	22
Figura 2: Ilustración gráfica de la ubicación de la rejilla sobre el tronco del árbol.....	31
Figura 3: Ubicación espacial de los árboles seleccionados en el área de estudio.....	37
Figura 4: Conteo de frecuencia de cada biotipo de líquen.....	39
Figura 5: Porcentaje (%) de cobertura líquénica por biotipo.....	40
Figura 6: IPA promedio por biotipo de líquen.....	41
Figura 7: Comportamiento del IPA por biotipo durante el monitoreo.....	42
Figura 8: Concentración de los contaminantes durante el periodo de monitoreo.....	43
Figura 9: Rosa de vientos, hacia donde se dirigen los vientos.....	45
Figura 10: Concentración del PM ₁₀ y O ₃ en el espacio.....	46
Figura 11: Dispersión del PM ₁₀ y O ₃ en el espacio a través del tiempo.	47
Figura 12: Elevación de los contaminantes	47

Resumen

En el presente estudio se evaluó la eficiencia de los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire en un tramo de la vía Villavicencio –Acacias, para tal fin se analizó el comportamiento que presentaron estos organismos ante variaciones del estado del aire en el área de estudio, por medio de una correlación estadística lineal entre los líquenes y una estación de monitoreo de calidad del aire ubicada en la zona. Para ello, se calculó el Índice de Pureza Atmosférica (IPA) por cada biotipo de líquen identificado. Asimismo a través de los datos suministrados por la estación de monitoreo se efectuó la construcción de la rosa de vientos y se realizó un modelo Lagrangiano de Hysplit con el cual se simuló la dispersión de los contaminantes con el objetivo de identificar las zonas de mayor afectación.

En lo que atañe a la correlación, se realizó por medio del coeficiente de Pearson, con el que se logró determinar que para el presente caso existe una asociación entre el biotipo de líquen folioso con el O_3 y el costroso con el PM_{10} , y en cuanto a los otros biotipos y contaminantes, no se logró determinar asociación alguna debido a que el porcentaje de probabilidad de error fue superior al 10%.

A partir de los datos arrojados por la estación y el monitoreo de los líquenes se concluyó que la calidad del aire en la zona es óptima y favorable para los seres vivos, en razón a que la concentración de los contaminantes no superan los niveles máximos permisibles y el biotipo con mayor porcentaje de cobertura líquénica fue el folioso siendo este un bioindicador de buena calidad del aire por su frecuente presencia en zonas no contaminadas.

Palabras clave: Calidad del aire, bioindicadores, líquenes, Índice de Pureza Atmosférica.

Abstract

In the present study, the efficiency of lichen as bioindicators of air quality in a section of the Villavicencio –Acacias route was evaluated, for this purpose the behavior observed by these organisms before variations in the state of the air in the study area was analyzed. , by means of a linear statistical correlation between the lichens and an air quality monitoring station located in the area. For this, it calculated the Atmospheric Purity Index (IPA) for each biotype of liquor identified. Likewise, through the data provided by the monitoring station, the construction of the wind rose was carried out and a Lagrangian model of Hysplit was carried out with which the dispersion of the pollutants was simulated in order to identify the areas of greatest impact.

Regarding the correlation, it was carried out by means of the Pearson coefficient, with which it was determined that for the present case there is an association between the biotype of foliar liquor with the O₃ and the crusty with the PM₁₀, and in terms of the other biotypes and contaminants, the association will not be determined because the percentage of probability of error was greater than 10%.

From the data released by the station and the monitoring of lichens, it was concluded that the air quality in the area is optimal and favorable for living beings, due to the concentration of pollutants they do not exceed the maximum permissible levels and the The biotype with the highest percentage of liquid coverage was the foliose being a bioindicator of good air quality due to its frequent presence in uncontaminated areas.

Keywords: Air quality, bioindicators, lichens, Atmospheric Purity Index.

1. Introducción

El uso de organismos para estimar los niveles de contaminación presentes en el ambiente, es una técnica que se ha venido utilizando notablemente en los últimos años (Conti & Cecchetti, 2001), ya que responden de diferentes maneras a cambios ocurridos en el medio en el que viven, debido a que algunas especies son muy sensibles a los cambios provocadas en su hábitat (Anze, Franken, Zaballa, Pinto, & Zeballos, 2007). Entre estos, los líquenes representan uno de los bioindicadores de calidad del aire más utilizados, pues estos absorben la mayoría de sus nutrientes de él y resultan ser muy sensibles ante las alteraciones atmosféricas, reflejando cambios en su tamaño, color, presencia y ausencia (Hawksworth, Iturriaga, & Crespo, 2005); por tal motivo son el objeto de la presente investigación en la que se evalúa la eficiencia de los mismos como bioindicadores de la calidad del aire.

En esta investigación se contempla el uso de los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire y como una alternativa de menor costo económico frente las de redes de monitoreo convencionales, pues estas requieren de una alta inversión para su implementación y operación; por lo tanto el uso de los líquenes representan una metodología más sencilla y accesible para municipios que no cuenten con los recursos suficientes para la implementación de tecnología específica, e incluso para el monitoreo de áreas puntuales, por medio de los cuales se puede dar un concepto acerca del estado de la calidad del aire e identificar señales de alarma y actuar con equipos de mayor precisión en caso de requerirlo.

Para llevar a cabo el objetivo principal, se realizan monitoreos in situ de estos organismos, durante cuatro (4) meses, en la vía de comunicación intermunicipal entre el municipio de Villavicencio con Acacias, entre el Kilómetro 3 y 4, siendo esta una zona industrial, de alto flujo vehicular, condiciones idóneas para observar su comportamiento ante las variaciones de contaminantes en el aire.

2. Planteamiento del problema

El estado de la calidad del aire es un factor que ha tomado gran importancia a través de los años, pues el deterioro que este ha presentado debido a la emisión de contaminantes por industrias manufactureras y vehículos automotores ha afectado a más del 95% de la población mundial, cifra correspondiente a aquellas personas que viven en áreas urbanas (Health Effects Institute, 2018), donde se encuentran expuestas a concentraciones de los compuestos gaseosos y partículas en el aire como el ozono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y material particulado menor a 10 micras y a 2,5 micras (Hernández, A., Guzmán, L., Moreno, Y., & IDEAM, 2012), causando entre el 20% y el 42% de las infecciones por vías respiratorias (López, 2011) representadas en cerca de 35.000 muertes anuales en América Latina y el caribe (Hernández & Molina, 2015), además de causar cerca de 5000 muertes perinatales por año en Colombia ocasionando costos de morbilidad y mortalidad de más de 5,7 billones de pesos anuales (Hernández & Molina, 2015).

Dado lo anterior, el constante monitoreo de los niveles de contaminación en el aire, es de carácter indispensable, por ello, varias ciudades de Colombia han implementado redes de estaciones de calidad del aire; según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, el país cuenta con 159 estaciones distribuidas en 23 sistemas de vigilancia, por medio de los cuales se puede establecer las áreas con los más altos niveles de contaminantes establecidos en la norma nacional y la posible afectación humana (IDEAM, 2017).

Villavicencio hace parte de una de las ciudades que cuenta con una red de monitoreo de calidad del aire, conformada por tres estaciones, ubicadas en el barrio la Esmeralda, parque de la vida Cofrem y Catumare, sin embargo, la implementación de estos equipos resulta ser muy costosa, además, requiere de personal capacitado para su operación (MAVDT, 2008), por lo tanto, en diferentes municipios del país no se cuenta con instrumentos que permitan tener un concepto acerca del estado de la calidad del aire, de manera que se hace necesario contemplar

métodos alternativos que cumplan con dicha función y que requieran de menor inversión, permitiendo identificar situaciones de alerta y en su defecto actuar con equipos de mayor precisión según la importancia del evento.

En este sentido, el uso de bioindicadores para estimar los niveles de contaminación presentes en el ambiente, es una técnica que se ha venido implementando notablemente en los últimos años (Conti & Cecchetti, 2001) ya que responden de diferentes maneras a las alteraciones del medio en el que viven, debido a que algunas especies son muy sensibles a los cambios provocadas en su hábitat (Anze, Franken, Zaballa, Pinto, & Zeballos, 2007).

En virtud de lo anterior, se han desarrollado estudios con bioindicadores para la calidad del aire, dentro de estos los líquenes conforman una de las especies más utilizadas para este fin (McMullin, Ure, Smith, Clapp, & Wiersma, 2017), dado que son muy sensibles a la perturbación de su hábitat y pueden proporcionar información para prevenir posibles afectaciones a la salud de la población (Varela & López-Sánchez, 2018).

2.1. Formulación en torno al problema

Se plantea la siguiente pregunta problema ¿Cuál es la eficiencia de los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire en el Kilómetro 3 al 4 de la vía Villavicencio – Acacias mediante la correlación por Pearson con los parámetros monitoreados por la estación Montealegre?

2.1.1. Hipótesis nula: Los líquenes son deficientes bioindicadores de la calidad del aire en el kilómetro 3 al 4 de la vía Villavicencio – Acacias.

2.1.2. Hipótesis alternativa: Los líquenes tienen una alta eficiencia como bioindicadores de la calidad del aire en el kilómetro 3 al 4 de la vía Villavicencio - Acacias.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Evaluar la eficiencia de los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire en el Kilómetro 3 al Kilómetro 4 de la vía Villavicencio – Acacías mediante su correlación con los parámetros monitoreados por la estación de Calidad del Aire Montealegre.

3.2. Objetivos Específicos

- Determinar el Índice de Pureza Atmosférica (IPA), mediante la identificación del biotipo de los líquenes presentes en el área de estudio.
- Estimar las zonas de mayor aporte de contaminantes a partir de los datos reportados por la estación de calidad del aire Montealegre comparándolos con la rosa de vientos.
- Analizar la correlación entre el IPA obtenido y los parámetros medidos por la estación de Calidad del Aire.

4. Justificación

Villavicencio es una ciudad que se encuentra en constante crecimiento económico y poblacional, lo que ha traído consigo el aumento de vehículos automotores e industrias manufactureras, situación que pone en riesgo la salud de la población y el medio ambiente, dado que estas actividades son las principales fuentes emisoras de sustancias tóxicas al aire como los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, compuestos orgánicos volátiles, material particulado, entre otros. Por lo tanto, supervisar los niveles de contaminantes en el aire se ha convertido en una necesidad y para ello se utilizan redes de monitoreo de calidad del aire que permiten recolectar información sobre la concentración de compuestos gaseosos de origen antropogénico y natural, además del comportamiento de las variables meteorológicas que regulan la distribución de los mismos en la atmósfera (Secretaría Distrital de Ambiente, 2013), de manera que se hace posible actuar de forma preventiva o correctiva ante las diferentes situaciones (M. Gaitán, Cancino, & Behrentz, 2007).

Dado lo anterior, Villavicencio cuenta con una red de monitoreo de calidad del aire compuesta por tres estaciones ubicadas estratégicamente en el barrio la Esmeralda, parque de la vida Cofrem y Catumare, sin embargo, este tipo de tecnología requiere de una alta inversión para su implementación y de personal capacitado para su operación, razón por la cual se convierte en un método poco factible para muchos municipios de Colombia (MAVDT, 2008).

En este sentido, es necesario contemplar alternativas económicamente viables, por medio de las cuales se pueda obtener información acerca del estado de la calidad del aire, entre estas, se ha evidenciado que el uso de bioindicadores conforman una metodología menos costosa y más sencilla (Hawksworth, Iturriaga, & Crespo, 2005); para el caso de la calidad del aire, los líquenes representan uno de los organismos más utilizados con este propósito, ya que son muy sensibles a las alteraciones en la atmosfera, de tal manera que afecta en su cobertura, tamaño, abundancia, frecuencia presencia y ausencia (R. Lijteroff, L. Lima, & B. Prieri, 2009), convirtiéndose en una técnica que funciona como complemento a los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire para zonas específicas o áreas en las que no abarque el monitoreo de las estaciones y no de manera

definitiva, debido a que a pesar de su importante funcionamiento como bioindicadores es indispensable comprender que los líquenes nunca podrán reemplazar totalmente a los equipos que miden la contaminación del aire por medio de parámetros físico – químicos (Nimis, Scheidegger, & Wolseley, 2002).

Con dicho propósito, se requiere la presente investigación, la cual consiste en la evaluación de los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire, para la ciudad de Villavicencio, de manera que se propone como necesidad identificar la viabilidad de cada uno de los biotipos presentes en el área de estudio y su potencial como indicadores de la calidad del aire.

Dicha evaluación se realizó en el kilómetro 3 al 4 de la vía Villavicencio - Acacias debido a que es una carretera nacional de alto flujo vehicular, en especial los considerados de carga pesada, como volquetas, camiones, carro tanques, entre otros, también, es una zona donde hay presencia de industrias; convirtiéndose en un área de estudio ideal, conforme a que estas dos condiciones representan las actividades de fuentes móviles y fijas respectivamente, que generan mayores emisiones a la atmósfera.

5. Alcance

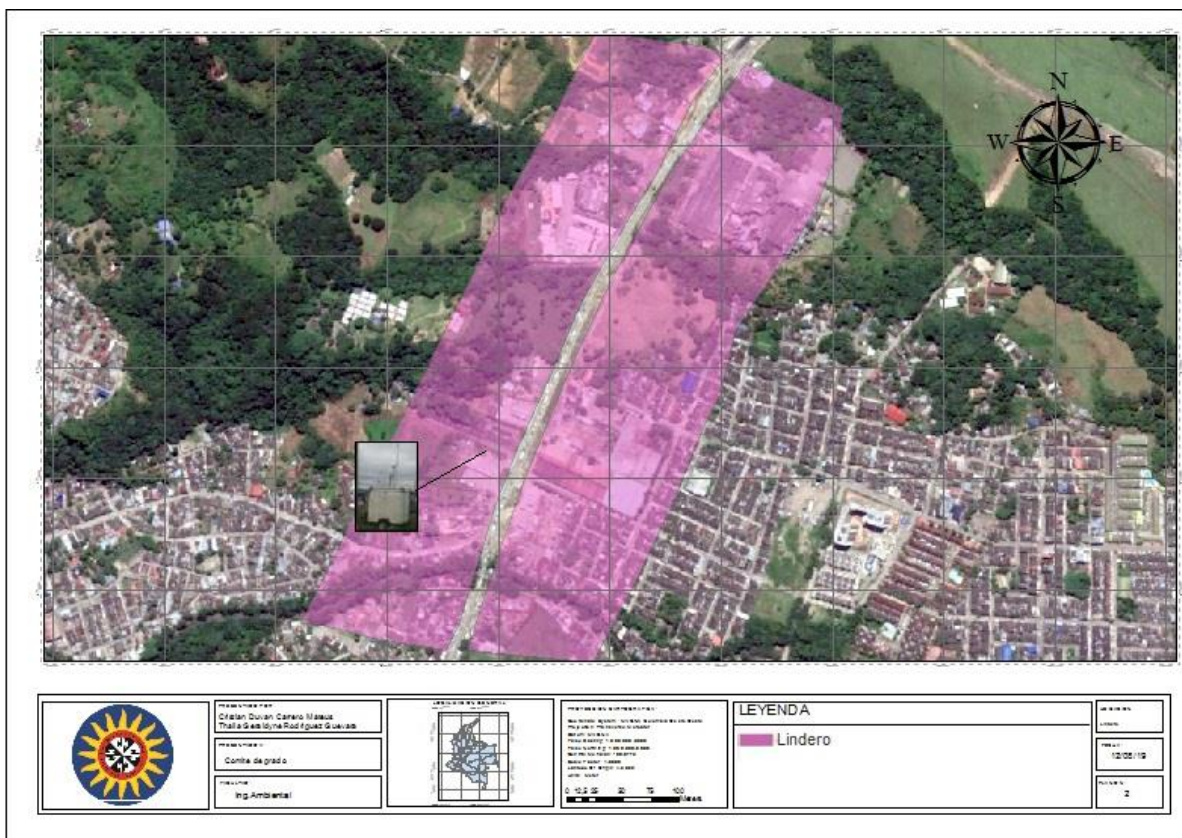


Figura 1: Área de estudio (Cristian Carrero, 2019).

Esta investigación tuvo como objetivo principal evaluar la eficiencia de los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire, por medio de una correlación entre el IPA y los datos obtenidos de la estación Montealegre que se encuentra ubicada en el barrio Catumare de la ciudad de Villavicencio, con el propósito de proponer una metodología más simple y menos costosa para monitorear la calidad del aire, dicho estudio se llevó a cabo entre el Kilómetro 3 y el Kilómetro 4 de la vía Villavicencio – Acacias abarcando hasta 150 metros hacia los linderos.

A partir de la medición de la frecuencia, abundancia, tamaño, presencia o ausencia de líquenes y la identificación del biotipo al que pertenecen, se calculó el índice de Pureza Atmosférica y con esto se realizó un análisis cuantitativo de los datos obtenidos tras realizar la correlación con los datos medidos por la estación de calidad del aire. Finalmente se dio una opinión crítica orientada a la viabilidad del uso de líquenes como bioindicadores de la calidad del

aire, para áreas no monitoreadas de la ciudad, de manera que estos sirvan como herramienta complementaria y señal de alarma a la presencia de contaminantes atmosféricos y la posible afectación a la salud humana y el medio ambiente.

El estudio se desarrolló en un periodo de tiempo de cuatro (4) meses, en los que se evaluó el comportamiento de los líquenes y se tomó registro fotográfico del estado de estos organismos, en una frecuencia de dos (2) veces por semana, de manera que fue posible realizar una comparación del comportamiento de los líquenes a lo largo del periodo de monitoreo y así se logró proporcionar una conclusión acertada en cuanto a la eficiencia de los líquenes como bioindicadores.

6. Marco de Referencia

6.1. Marco Teórico

De acuerdo a los análisis realizados, uno de los problemas ambientales de mayor preocupación para los colombianos es la presencia de sustancias extrañas las cuales pueden variar durante periodos de tiempo suficientemente prolongados y sus contaminantes más comunes son el dióxido de azufre (SO₂), los oxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), el ozono (O₃), el plomo (Pb) y el material particulado (IDEAM, 2011).

Estos contaminantes en el aire son monitoreados por las autoridades Ambientales (Corporaciones Autónomas Regionales, Corporaciones de Desarrollo Sostenible y Autoridades Ambientales Urbanas) mediante Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire – SVCA, diseñados y operados conforme a los criterios que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ha definido (MAVDT, 2015). Los efectos que generan los contaminantes en la salud de las personas hacen que sea de gran importancia monitorear la calidad del aire en las ciudades para generar estrategias de control y regulación de las emisiones(Figueroa & Montoya, 2015).

El uso de organismos sensibles a cambios en el ambiente (bioindicadores) para evaluar la contaminación, se ha llevado a cabo notablemente en las últimas décadas (Conti & Cecchetti, 2001). Para el caso de organismos que responden a los cambios y presencia de contaminación en el aire se encuentran los líquenes, ya que estos obtienen la mayor parte de sus nutrientes de la atmosfera, por lo tanto responden ante los cambios en su hábitat reflejando variación en su tamaño, color, frecuencia y hasta en presencia o ausencia de algunas especies, situación que no es común en otros organismos de similar sensibilidad (Hawksworth, Iturriaga, & Crespo, 2005a), además la abundancia en su presencia y el hecho que crecen naturalmente in situ, los hace parte de una metodología simple para complementar el costoso monitoreo de la calidad del aire por medio de instrumentos especializados (Will-Wolf, Jovan, & Amacher, 2017).

Por lo tanto, se han realizado estudios para la evaluación la calidad del aire en diferentes ciudades, por medio de líquenes como bioindicadores y el cálculo del IPA (Canseco, Anze, & Franken, 2006), (Quispe, Ñique Alvarez, & Chquilin, 2013), (Ciro1 & Botero, 2010). Según dichos estudios estos organismos logran proporcionar información acerca de los niveles de contaminación presentes en el aire, pues los resultados obtenidos en cuanto a su presencia o ausencia, frecuencia y tamaño, coinciden con los datos medidos por medios fisicoquímicos y biológicos, como también por estaciones de monitoreo de calidad del aire.

Dado lo anterior, se propone como objetivo principal de la presente investigación, evaluar la eficiencia de los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire en la ciudad de Villavicencio, con el propósito de determinar si la implementación de estos organismos es viable como metodología alternativa y complementaria al Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire en la ciudad, de manera que sirva como señal de alerta en aquellas áreas donde la red de monitoreo no tenga cobertura.

6.2. Marco Conceptual

Calidad del aire: El estado del aire representa un factor importante para la vida, ya que está constituido de compuestos indispensables para los seres vivos y la salud humana, como lo son el carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, que permiten que se lleven a cabo procesos como la fotosíntesis, la respiración, la humedad y temperatura optima, entre otras (Cabrera & Giacobone, 2010). Sin embargo, el aire puede ser contaminado de manera natural o antrópica, por medio de la ejecución de diferentes procesos industriales, los cuales causan una alteración física, química o biológica, como la emisión de pequeñas partículas al aire (IDEAM, 2014) entre estos, el dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), material particulado menor a 10 micras (PM₁₀) y a 2,5 micras (PM_{2,5}), que al entrar en el cuerpo humano aumentan el riesgo que padecer enfermedades respiratorias agudas, como la neumonía, y crónicas, como el cáncer de pulmón y las enfermedades cardiovasculares (World Health Organization, 2018).

Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire: Es necesario mantener monitoreada la calidad del aire y para esto se utiliza generalmente medios físico – químicos, como los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), los cuales brindan información acerca del comportamiento de los contaminantes atmosféricos PM₁₀, PM_{2,5}, SO₂, NO₂, O₃ y CO denominados como contaminantes criterio (MADS, 2018); estos pueden ser híbridos, manuales o automáticos, según su tecnología, y requieren de equipos especializados, además, de la supervisión y manipulación de personal capacitado, para garantizar su correcto funcionamiento, ocasionando altos costos de implementación (MAVDT, 2008).

Bioindicadores: Consisten en el uso de organismos que reaccionan ante diferentes grados de alteración del medio en el que viven, como lo son, diferentes especies de plantas vasculares, algas, líquenes, hongos, animales vertebrados y animales invertebrados (R. Lijteroff, L. Lima, & B. Prieri, 2009), estos funcionan como métodos alternativos y de menor costo que proporcionan información acerca de los cambios que ocurren en el ambiente, de manera que funcionan como señales de alerta y son complementarios a las metodologías convencionales.

Líquenes: Los líquenes representan unos de los organismos más utilizados como bioindicadores de la calidad del aire, ya que proveen información del impacto causado por medio de estudios rápidos y poco costosos (Loppi, Ivanov, & Boccardi, 2002); lo cual es posible gracias a que estos organismos son producto de la asociación simbiótica entre un hongo y un alga, no tienen raíces ni cutícula, por lo tanto, se encuentran totalmente expuestos a los contaminantes presentes en el aire, y al depender de la fuente aérea para sus nutrientes, absorben también los contaminantes atmosféricos, los cuales se acumulan en sus tejidos alterando su tamaño, abundancia y diversidad (Cabrera & Giacobone, 2010); se pueden encontrar en casi todo tipo de ambiente terrestre, en especial sobre la roca desnuda o la corteza de los árboles, sin ocasionar el menor daño (Cabrera & Giacobone, 2010).

Biotipos de líquenes: Los líquenes cuentan con una amplia variedad morfológica, clasificados en biotipos o también llamadas formas de crecimiento:

- Foliosos: Sus bordes son extensos y lobulados, tienen forma de hoja y se encuentran adheridos al sustrato de manera parcial (Valencia, 2002).

- Fruticosos o fruticulosos: Tienen forma de arbustillos, ramificados, erectos y colgantes, están poco adheridos al sustrato, dependen de la humedad relativa del aire para su hidratación y su tamaño puede ser muy variado, desde 1cm hasta varios metros (Barreno Rodríguez & Pérez Ortega, 2003). Este biotipo de líquen tienden a aparecer en áreas nubladas, en la costa de los océanos y en regiones montañosas (Gelambi, 2019).

- Costrosos o crustáceos: Están fuertemente adheridos al sustrato por medio de su zona inferior y en la mayoría de su superficie (Valencia, 2002).

- Escamulosos: Son los más especializados de los costrosos y representan el paso hacia los foliosos; tienen forma de escamas o ampollas y tienden a separarse del sustrato en los bordes (Barreno Rodríguez & Pérez Ortega, 2003).

Estos biotipos morfológicos de líquenes pueden ser hallados por separado o juntos en un mismo árbol o sustrato, dependiendo la calidad del aire de la zona y algunas variables como la altitud del lugar (Cabrera & Giacobone, 2010). Lo cual ha sido demostrado por diversos estudios realizados en países como Italia, Perú, Bolivia, Argentina, Colombia, entre otros; en los que se evalúan estos organismos en comparación con lo medido por medios físico – químicos, comprobando que los líquenes reaccionan ante las alteraciones producidas en el aire.

PM₁₀: Es un contaminante que es originado a partir de una gran variedad de fuentes naturales o antropogénicas y poseen un amplio rango de propiedades morfológicas, físicas, químicas y termodinámicas (Arciniegas, 2012), además, es un contaminante que no sedimenta en periodos cortos sino que permanece suspendido en el aire debido a su tamaño y densidad (MAVDT, 2008b).

O₃: Es un compuesto contaminante que se produce de manera natural, dando lugar a pequeñas concentraciones inocuas en el aire, las cuales son procedentes de la vegetación y procesos de fermentación (Muerza, 2006).

Coefficiente de Pearson: El coeficiente de correlación de Pearson permite medir la fuerza de asociación entre dos variables cuantitativas, con una distribución bivariada (Lizama & Boccardo, 2014). Los valores de esta correlación van desde -1 hasta 1, siendo los valores extremos los que indican mayor correlación, la cual puede ser directa o inversa según el signo positivo o negativo y el valor de 0 aquel que indica que no existe correlación alguna (Lizama & Boccardo, 2014).

Además del nivel de correlación que se obtenga mediante el análisis en SPSS es importante tener en cuenta el valor de significación, el cual debe estar por debajo del 5% (0,05), ya que esta es la probabilidad de error o error alfa α ; si la significación es mayor al error alfa, no se puede señalar que existe asociación entre las variables (Lizama & Boccardo, 2014).

6.3. Marco Legal

Tabla 1

Normatividad legal que aplica para el proyecto

Norma	Publicado por	Establece
Constitución política de Colombia 1991 “Artículo 79”		Derecho de gozar de un medio ambiente sano.
Resolución 601 de 2006	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	Por la cual se establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión para todo el territorio nacional en condiciones de referencia, niveles máximos permisibles.
Resolución 910 de 2008	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.	Por la cual se reglamenta los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones.
Resolución 650 de 2010	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.	Por la cual se adopta el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire.
Resolución 2254 de 2017	Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.	Por la cual se adopta la norma de calidad del aire y se dictan otras disposiciones.

Nota: Recopilación de normatividad relacionada con la calidad del aire. Por: Carrero & Rodríguez, 2019

7. Metodología

7.1. Fase I. Identificación de líquenes en el área de estudio y cálculo del IPA

7.1.1. Selección de los árboles: En esta fase se hizo un reconocimiento en la zona de estudio para seleccionar los individuos ‘especies arbóreas’ sobre los que se realizaría el inventario de líquenes, para esto se tuvo en cuenta las siguientes características de acuerdo con lo propuesto por (Angela Canseco, Rafael Anze, & Margot Fraken, 2006):

- Diámetro del tronco comprendido entre 20 y 40 cm y aproximadamente entre 60 y 120 cm de perímetro. La medición correspondiente se realizó a cada árbol de manera individual usando un metro; de modo que así se puede estimar que los individuos seleccionados pertenecen a árboles con edades parecidas.
- Ejemplares no incluidos en formaciones arbóreas excesivamente cerradas.
- Individuos de corteza rugosa.
- Árboles inclinados, dañados, pintados y de corteza lisa fueron excluidos.

Se seleccionaron árboles de una misma especie para garantizar que el sustrato sobre los cuales crecen los líquenes fuera similar, y sus cortezas fueran propicias para el crecimiento de líquenes, por lo tanto, la especie elegida fue aquella que presentó mayor abundancia a lo largo del área de estudio, de manera que se pudiera obtener un número de resultados significativo.

Como medida de aseguramiento se tomaron datos para cada árbol de: ubicación geográfica utilizando un GPSMAP 64s Garmin, diámetro a la altura del pecho utilizando un metro y pH ex-situ de cada uno de los árboles seleccionados, con el propósito de demostrar que los líquenes a monitorear están creciendo en condiciones similares en cuanto al sustrato en el que se encuentran; para este último, se recolectó una pequeña muestra de corteza de cada árbol, las cuales se guardaron en bolsas de papel (con el fin de reducir la pérdida de sustancias volátiles presentes en la corteza) debidamente marcadas y cada muestra se procesó en el laboratorio de La

Universidad Santo Tomas, sede Villavicencio; la medición del pH se realizó tomando 1gr de corteza por cada árbol, se trituró hasta que quedara en trozos muy pequeños y se maceró durante 2 minutos en agua destilada, se dejó reposar durante 10 minutos y luego se midió el pH con un multiparámetro Multi 3630 IDS – WTW.

7.1.2. Monitoreo de líquenes: Para esta actividad se llevó a cabo la metodología del Manual Red CE nivel II (Servicio de Sanidad Forestal y Equilibrios Biológicos SSF, 2000), donde se elaboró una rejilla con material de plástico por cada árbol sobre el que realizaría el monitoreo de los líquenes, la cual está dividida en 10 subcuadros de 10x10cm, las cuales fueron instaladas en cada uno de los ejemplares, de manera que se ubicó sobre el tronco del árbol seleccionado y el centro de la rejilla quedó sobre la cara donde había mayor cobertura liquénica, cuidando que la distancia al suelo fuera al menos de 120 cm (Figura 2); Se sujetó la rejilla al tronco utilizando chinchas, con el fin que se mantuviera la forma de cada uno de los 10 subcuadros.

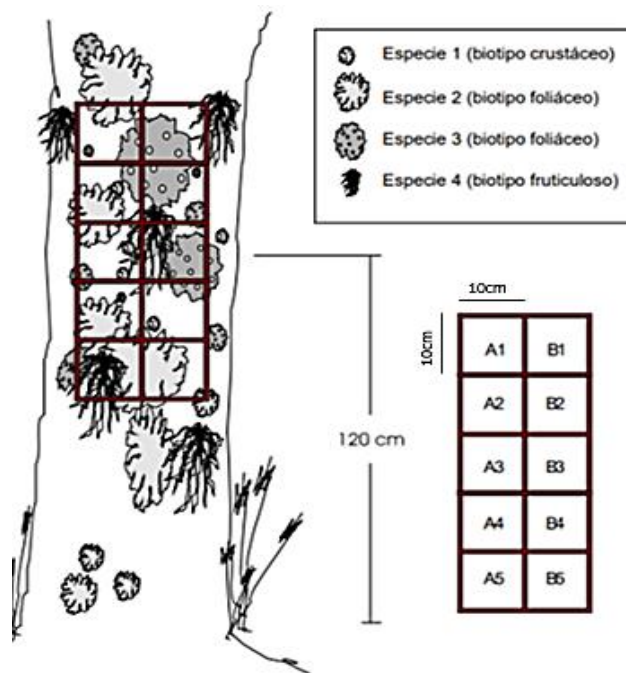


Figura 2: Ilustración gráfica de la ubicación de la rejilla sobre el tronco del árbol (Servicio de Sanidad Forestal y Equilibrios Biológicos SSF, 2000).

7.1.3. Conteo de frecuencia de cada biotipo de liquen y cobertura liquénica: Metodología propuesta por el Manual Red CE nivel II (Servicio de Sanidad Forestal y Equilibrios Biológicos SSF, 2000); Se identificó los biotipos de líquenes presentes en cada árbol y se contó el número de subcuadros en los que aparece al menos una vez, y este representó el valor de su frecuencia.

Los valores de frecuencia pueden oscilar desde 0 a 10 (0 si el biotipo de la lista no se encuentra representada en el área de inventario y 10 si se encuentra representada en todos los subcuadros del área de inventario). El conteo se realizó durante cuatro (4) meses, con una periodicidad de dos veces por semana.

Para calcular el porcentaje de cobertura liquénica, se tomó registro fotográfico de las rejillas instaladas en cada uno de los árboles durante las fechas en las que se realizó los monitoreos, y estas imágenes fueron empleadas para medir el área ocupada por cada biotipo de liquen, para este procedimiento, se midió el área de cada biotipo en cm^2 por medio del programa Image J y se consideró una única estación (Rasband, 1997). Para los respectivos cálculos se utilizó Microsoft Excel 2016.

Ecuación 1: Porcentaje (%) de cobertura liquénica (Figueroa & Méndez, 2015)

$$\% \text{ Cobertura liquénica} = \frac{\text{área ocupada por cada biotipo de líquen}}{\text{área total ocupada por líquenes}} * 100$$

7.1.4. Cálculo del IPA: El Índice de Pureza Atmosférica (IPA) se calculó por medio de la siguiente fórmula (Ecuación 2), propuesta por (Rubiano, 2002).

Ecuación 2: Índice de Pureza Atmosférica IPA (Jaramillo Ciro & Botero Botero, 2010)

$$IPA_j = \frac{Q_i * f_i}{n} * C_i$$

Donde:

Q_i : Factor de resistencia del biotipo i (Ecuación 3).

C_i : Cobertura relativa del biotipo i en la estación j (sumatoria del área del biotipo i dividida sobre el mayor valor de área del biotipo i encontrado en la estación j).

f_i : Frecuencia del biotipo i (número de individuos de la estación j en que aparece el biotipo i).

n : Número de individuos censados en la estación j .

Ecuación 3: Grado de sensibilidad de las especies (Jaramillo Ciro & Botero Botero, 2010)

$$Q_i = \sum \frac{A_j - 1}{E_j}$$

Donde:

Q_i : Factor de resistencia del biotipo i .

E_j : Número de estaciones donde se halle i , (para el presente caso se considera una única estación).

A_j : Número de biotipos presentes en cada estación donde se encuentre i (número de biotipos hallados en la estación).

7.2. Fase II: Estimación de zonas con mayor carga de contaminantes

7.2.1. Solicitud de información: Se solicitó formalmente a la entidad CORMACARENA, Corporación Ambiental Regional que rige en el Meta, en la coordinación del grupo Aire y Urbano, la información de los registros de la estación de calidad del aire Montealegre correspondientes al tiempo que llevaba operando, de manera que se obtuvieron dichos datos de manera digital en formato Excel, estos datos fueron procesados estadísticamente por medio de métodos como lo son: Estadística descriptiva, medidas de variabilidad o dispersión, entre los cuales se utilizó datos la varianza, el rango y la desviación estándar (Miranda Ramos & Zambrano Muñoz, 2017).

7.2.2. Construcción de la rosa de vientos: Se llevó a cabo la construcción de la rosa de vientos a partir de los valores promedio de los datos medidos durante los 4 meses de monitoreo

por la estación de monitoreo de calidad del aire Montealegre, usando el software WRPLOT View de manera que se obtuvo una visión completa de la distribución, velocidad y dirección del viento en la zona.

7.2.3. Dispersión de contaminantes: Los datos obtenidos de la estación de calidad del aire Montealegre fueron procesados por medio de HYSPLIT por sus siglas en inglés (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) el cual, es un Modelo de Trayectoria Lagrangiana Integrada Híbrida de Partícula Única, empleada en el presente caso para calcular la trayectoria de los contaminantes en los vientos y poder observar la dispersión de los mismos a través del espacio (Méndez, Pinto Herrera, & Belalcázar Cerón, 2018). Para ello se ingresó el valor de la concentración de cada contaminante medido desde la estación de calidad del aire y las coordenadas de la misma, información que el modelo procesó y analizó.

7.3. Fase III: Análisis de la correlación entre el IPA obtenido y los registros de concentración de contaminantes de la estación de calidad del aire

7.3.1. Correlación por Pearson: Por medio de IBM SPSS Statistics 22 se realizó un análisis estadístico por correlación bivariada entre dos variables, las cuales fueron cada uno de los contaminantes.

Como primer paso, nos acercamos a la pestaña ‘Analizar’ > ‘Correlaciones’ > ‘Bivariadas’, seguidamente, tras aparecer un cuadro de dialogo, se seleccionaron las dos variables a analizar, siendo para este caso las siguientes: O3 – IPA folioso, O3 – IPA fruticoso, O3 – IPA costroso, O3 – IPA escamuloso, PM10 – IPA folioso, PM10 – IPA fruticoso, PM10 – IPA costroso y PM10 – IPA escamuloso.

Por último, se marcó entre las opciones posibles dentro de ‘Coeficientes de correlación’ la casilla correspondiente a Pearson y en ‘Prueba de significación’ la casilla correspondiente a Bilateral, además se marcó la casilla de ‘Marcar las correlaciones significativas’, opción que

añadió un asterisco (*) a la tabla de correlación, cuando el nivel de la significación fue menor a 0,05 y dos asteriscos(**) cuando fue menor a 0,01, lo que permitió identificar más rápidamente si existía o no correlación.

8. Resultados

8.1. Fase I. Identificación de líquenes en el área de estudio y cálculo del IPA.

8.1.1. Selección de los árboles: El área de estudio que se seleccionó es la vía de comunicación intermunicipal entre Villavicencio y Acacias, donde el tránsito vehicular es alto, además de ser una zona de uso industrial; se abarcó un transecto de 1km, comprendido desde el Kilómetro 3 al 4, con una cobertura de 150m hacia cada lado, donde se contó con tres zonas boscosas, las cuales fueron recorridas en su totalidad, con el propósito de realizar un reconocimiento de las especies de árboles presentes, que a su vez cumplieran con las características necesarias para llevar a cabo el estudio. Como resultado de este reconocimiento, se logró evidenciar que la especie que cumple con las características correspondientes es el Saladillo (*Caraipa llanorum* Cuatrec. – Clusiaceae), siendo esta la seleccionada, también, por ser la que tuvo mayor representación, pues esta especie se encontró en dos, de las tres zonas boscosas del área de estudio.

Una vez determinada la especie de árbol o sustrato, se eligieron aquellos individuos que no evidenciaron alteración por el hombre, además de cumplir con las especificaciones ya mencionadas (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), obteniendo como resultado 21 individuos a monitorear (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

En el siguiente mapa se ilustra la ubicación de los árboles seleccionados, el cual se elaboró por medio del software de ArcMap 10.2.2., donde se insertaron las coordenadas de cada uno (Figura 3), tomadas en campo con la ayuda de un GPSMAP 64s Garmin.



Figura 3: Ubicación espacial de los árboles seleccionados en el área de estudio (Cristian Carrero, 2019).

Una vez seleccionados los individuos a monitorear, se realizó el debido procedimiento para calcular el pH de la corteza de los árboles, obteniendo como resultado valores de pH que varían desde 6,11 a 7,43 (Apéndice C), por lo cual se clasifican entre un pH neutro, dentro de un rango óptimo para la presencia de vida sobre la corteza (Espitia, 2011); de esta manera también se garantiza que los líquenes a ser monitoreados cuentan con condiciones similares en cuanto al sustrato sobre el que crecen.

Estos resultados fueron sometidos a un análisis estadístico (Tabla 2) mediante el cual se permite observar que el valor promedio fue 6,71 con una desviación estandar entre los mismos de 0,34.

Tabla 2





Valores de pH

Valores de Ph	
\bar{X}	6,71
S	0,34

 \bar{X} : Promedio, S: Desviación estándar*Nota. Valores de pH de la corteza para analizar. Por: Carrero & Rodríguez. 2019.***8.1.2. Monitoreo de líquenes:**

Tabla 3

Biotipos de líquenes hallados

Biotipos de líquenes			
Folioso	Fruticoso	Costroso	Escamuloso
			

Nota. Biotipos de líquenes encontrados en el área de estudio. Por: Carrero & Rodríguez. 2019.

Tras finalizar la selección de los sustratos, se identificó en ellos la presencia de 4 de estos biotipos de líquenes, los cuales fueron folioso, fruticoso, costroso y escamuloso.

Al tener las rejillas instaladas, se dio inició al conteo de la frecuencia de cada biotipo de liquen identificado, proceso para el cual se siguió lo indicado por el Manual Red CE nivel II (Servicio de Sanidad Forestal y Equilibrios Biológicos SSF, 2000) expuesto en la metodología.

8.1.3. Conteo de frecuencia de cada biotipo de liquen y cobertura liquénica:

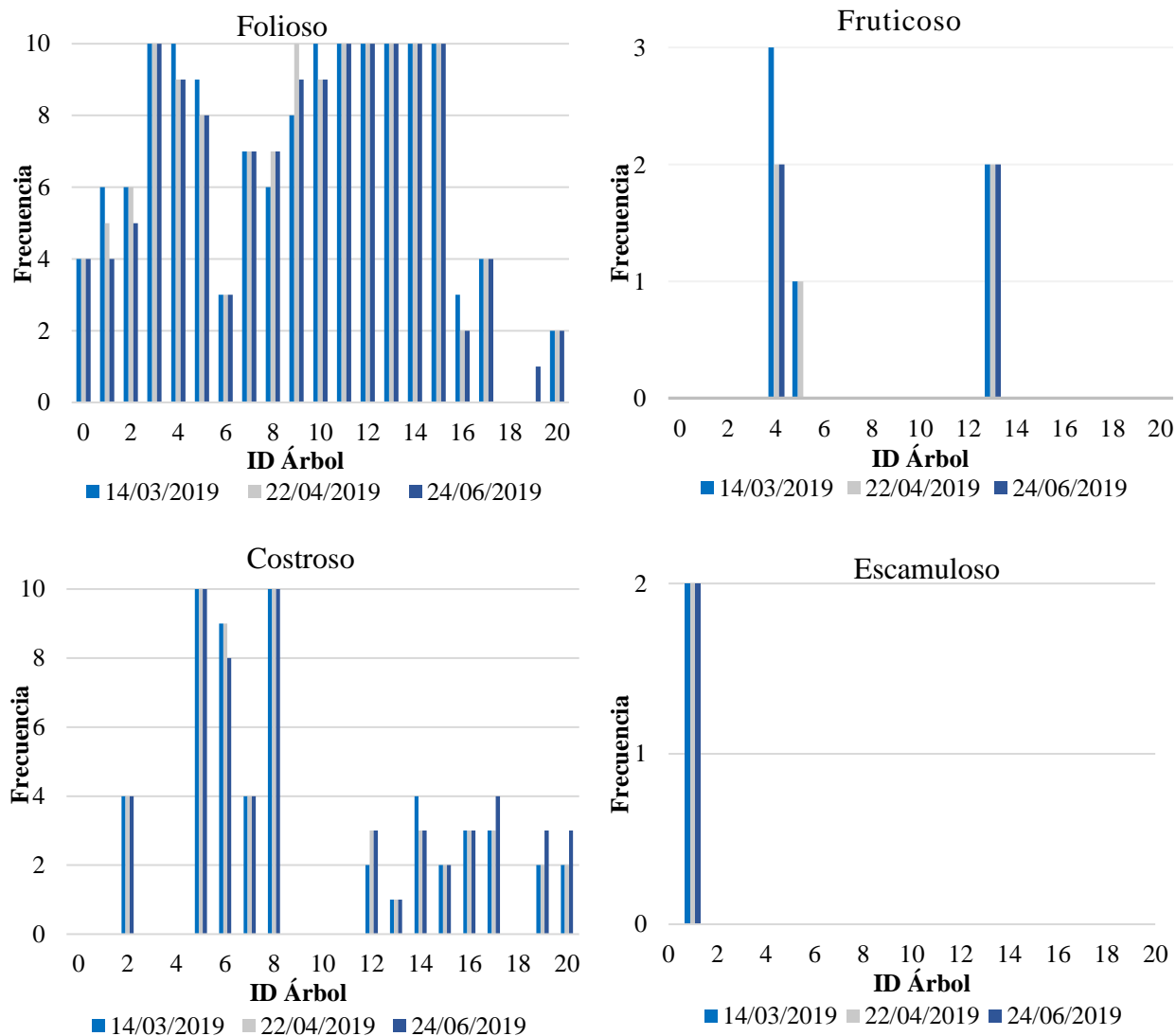


Figura 4: Conteo de frecuencia de cada biotipo de liquen (Thalía Rodríguez, 2019)

Como resultado del conteo de la frecuencia de los líquenes se encontró que estos no mostraron cambios en su cobertura a corto plazo, pues durante las 30 fechas monitoreadas se logró observar cambios de alrededor de una vez por mes, aunque no en todos los casos, ya que algunos árboles se mantuvieron constantes. En la Figura 4 se puede observar el comportamiento de la frecuencia de cada biotipo de liquen durante tres fechas, la fecha en la que se dio inicio a

los monitoreos, una intermedia y con la que se finalizó la etapa de monitoreos; estas fueron seleccionadas con el objetivo que ilustrar los cambios que se produjeron y poder apreciar la condición inicial y final en cuanto a este aspecto.

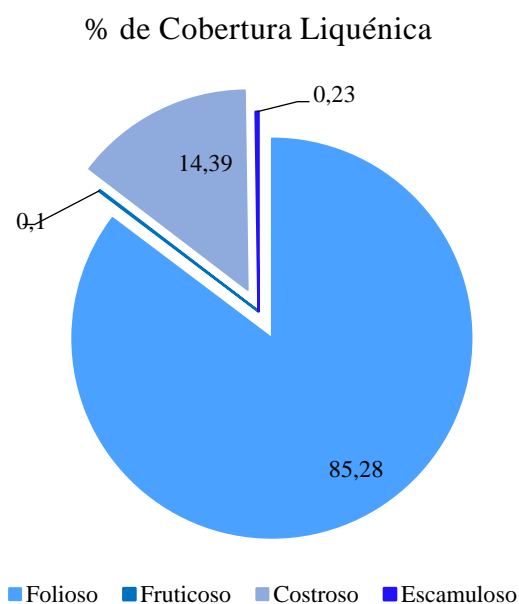


Figura 5: Porcentaje (%) de cobertura líquénica por biotipo (Thalía Rodríguez, 2019).

Como producto de la medición del área ocupada por cada líquen, se logró calcular el porcentaje (%) de cobertura líquénica para cada biotipo, de ahí fue posible observar que los líquenes foliosos ocuparon una mayor cobertura líquénica, como también puede apreciarse en la frecuencia con la que aparece en todos los árboles monitoreados. Su cobertura promedio fue de 85,28% como se muestra en la Figura 5.

En cuanto a los líquenes costrosos, la cobertura líquénica estuvo representada por el 14,39% como se puede observar en la Figura 5, sin embargo este tipo de talo es menos vulnerable a los cambios sufridos en la atmósfera, ya que tienen una unión más estrecha con el sustrato.

Por otra parte, los líquenes de talo escamuloso tuvieron una representación mínima, aunque mayor que los de biotipo fruticoso, pues su cobertura líquénica promedio fue de 0,23% y 0,1% respectivamente, aunque la cobertura de los fruticosos sea la menor, este tipo de liquen es considerado indicador de ecosistemas urbanos con buena calidad del aire (Crespo et al., 1981) y (Vergara et al., 2007).

8.1.4. Cálculo del IPA:

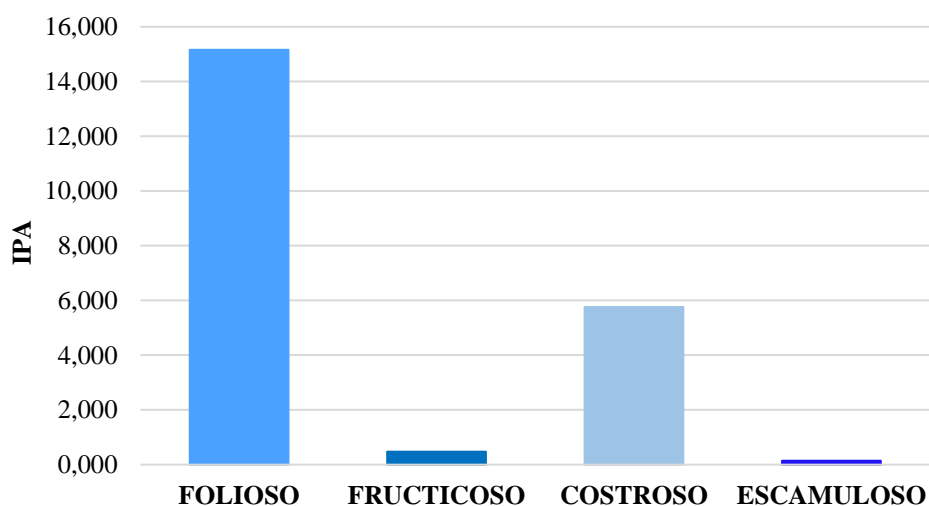


Figura 6: IPA promedio por biotipo de liquen (Cristian Carrero, 2019)

En cuanto a los valores de los IPAs, se obtuvieron los resultados ilustrados en la Figura 6: Folioso (15,159), Costroso (5,760), Fruticoso (0,474) y Escamuloso (0,143), estas cifras son el promedio calculado durante todas las fechas en las que se realizó el monitoreo, los valores por fecha pueden ser observados en el [Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#)

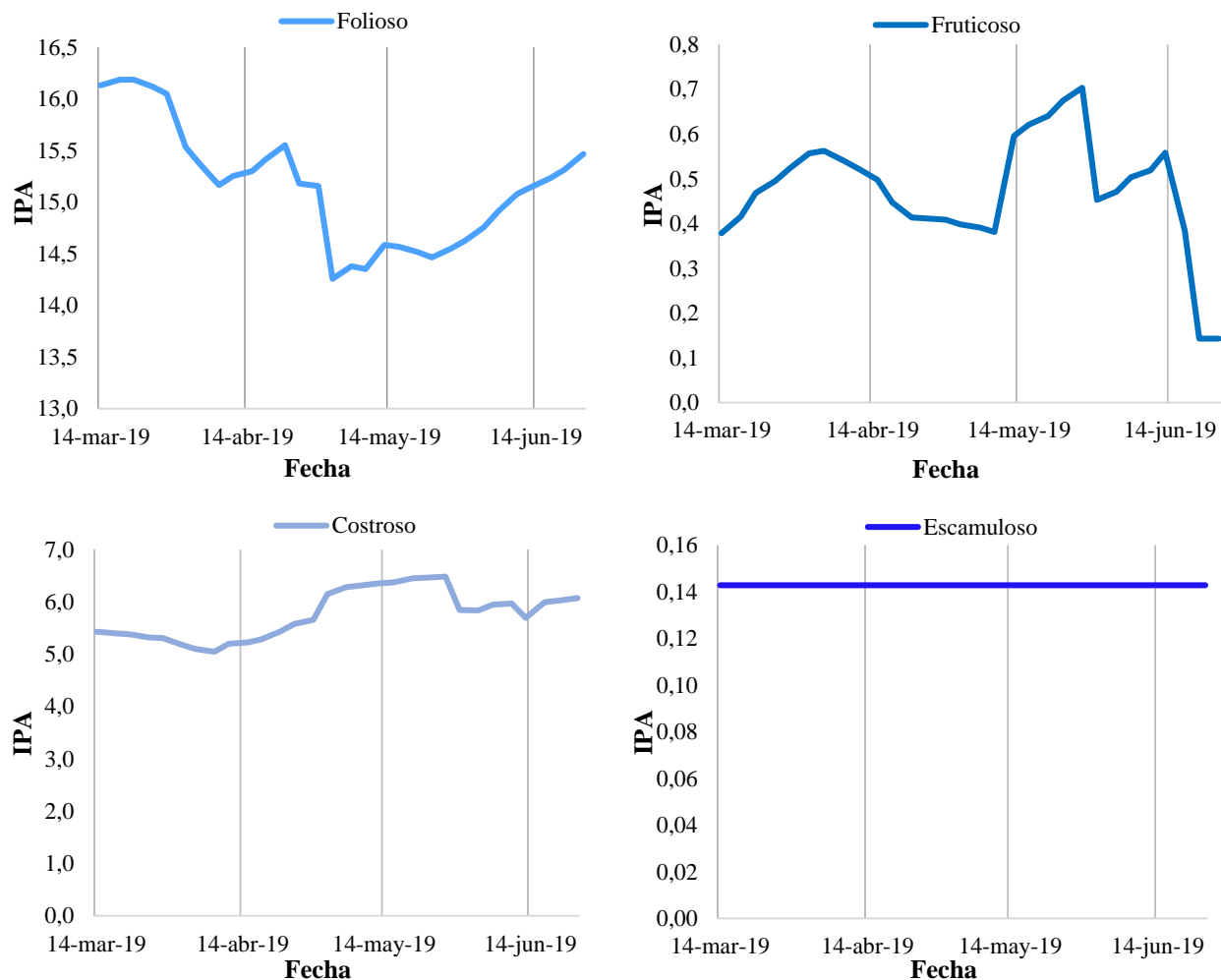


Figura 7: Comportamiento del IPA por biotipo durante el monitoreo (Cristian Carrero, 2019).

En la Figura 7 se presentan las gráficas del comportamiento del IPA por biotipo durante los cuatro meses de monitoreo, donde se muestra que el comportamiento de los líquenes foliosos es muy variado; por otro lado, el segundo biotipo con mayor abundancia fue el costroso, su comportamiento no reflejó cambios muy pronunciados; en cuanto al fruticoso, se mostró una reducción en su frecuencia; por último el escamuloso tuvo una representación muy baja, pues se encontró únicamente un líquen de este biotipo, el cual no presentó cambios en su cobertura que ocasionaran algún efecto en los monitoreos, por tal motivo el valor del IPA arrojó un dato constante, indicador de que este biotipo es poco sensible ante los cambios atmosféricos.

8.2. Fase II: Estimación de zonas con mayor carga de contaminantes

8.2.1. Solicitud de información: La estimación de las zonas con mayor carga de contaminantes fue uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta para el análisis del comportamiento de los líquenes en el área de estudio; pues para la ejecución de esta segunda fase, se consideraron los datos medidos por medios físico – químicos por la estación de calidad del aire Montealegre, información suministrada por CORMACARENA, entidad que proporcionó los registros de las concentraciones de los contaminantes durante los cuatro meses de monitoreos, los cuales fueron ilustrados en la Figura 8.

Dicha información fue sometida a un análisis de estadística descriptiva (Tabla 4).

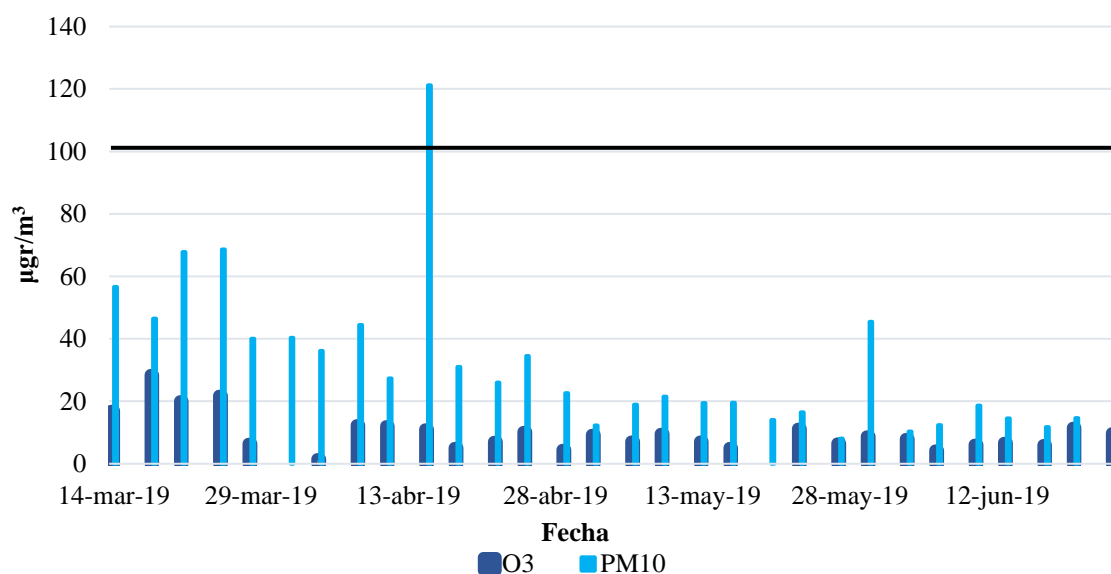


Figura 8: Concentración de los contaminantes durante el periodo de monitoreo (Cristian Carrero, 2019).

Según las concentraciones que fueron reportadas por la estación para el PM₁₀, se observó que obtuvo un promedio de 31,74µgr/m³, el cual es un valor que está por debajo del límite permisible, pero además, entre los mismos valores se tuvo una desviación estándar de

24,05 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ y una varianza de 578,32 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$, con un rango de 113,08 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Análisis estadístico de las concentraciones de PM₁₀ Y O₃

	PM ₁₀	O ₃
Media	31,74	9,81
Desviación estándar	24,05	5,86
Varianza de la muestra	578,32	34,31
Rango	113,08	26,99
Mínimo	8,04	1,46
Máximo	121,12	28,45

Nota Análisis estadístico de las concentraciones de PM₁₀ Y O₃ en el aire durante las fechas de monitoreos (Carrero & Rodríguez. 2019).

Según el comportamiento que tuvo el O₃ a lo largo de las fechas monitoreadas, como se observa en la Figura 8, presentó un comportamiento menos variado, en comparación con las concentraciones de PM₁₀, lo cual es confirmado por el análisis estadístico aplicado, resultados que pueden ser apreciados en la Tabla 4.

8.2.2. Construcción de la rosa de vientos: Para la elaboración de la rosa de vientos, se tuvo en cuenta los registros de la estación de calidad del aire Montealegre suministrados por CORMACARENA, pues de allí se extrajeron los datos de dirección de los vientos, velocidad de los vientos y precipitaciones, necesarios como entrada para generar la rosa de vientos utilizando el programa WRPLOT, el cual permite ilustrar la dirección de los contaminantes desde donde vienen y hacia dónde van; la Figura 9 presenta la relación de la dirección de los vientos y velocidad en la zona de estudio observando hacia donde van dirigidos los vientos.

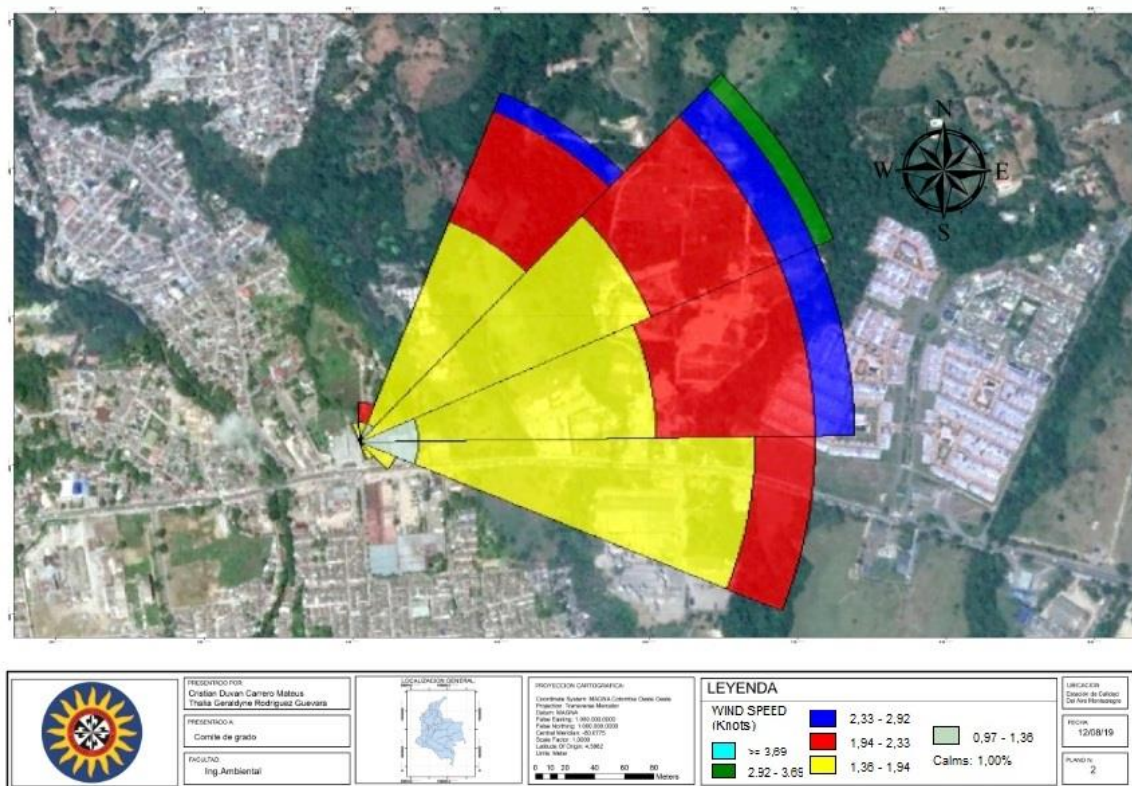


Figura 9: Rosa de vientos, hacia donde se dirigen los vientos (Cristian Carrero, 2019).

La rosa de vientos presenta la procedencia de la velocidad promedio en los cuatro meses de monitoreo; según la información que nos brinda estos datos es que la mayor incidencia de estos vientos sobre la zona de estudio es con dirección predominante del Norte al Noreste, a medida que aumenta de velocidad. Este comportamiento de los vientos, refleja que los contaminantes medidos por la estación son transportados en dirección plena al área de estudio, demostrando que los líquenes monitoreados estuvieron expuestos a las concentraciones que reportó la estación.

8.2.3. Dispersión de contaminantes: La concentración de los contaminantes a medida que son transportados por el viento, se dispersan y a su vez la concentración de los mismos disminuye, comportamiento que pudo ser observado por medio del modelamiento realizado mediante el software Hysplit (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory), de manera que como resultado se generaron tres mapas, por medio de los cuales se permite observar la distribución de los contaminantes a lo largo del día, su concentración (Figura 10), dispersión

(Figura 11) y elevación (Figura 12). A través de estos se identificaron las zonas de mayor carga de contaminantes en el área, la simulación se realizó desde marzo de 2019, con el método de movimiento vertical.

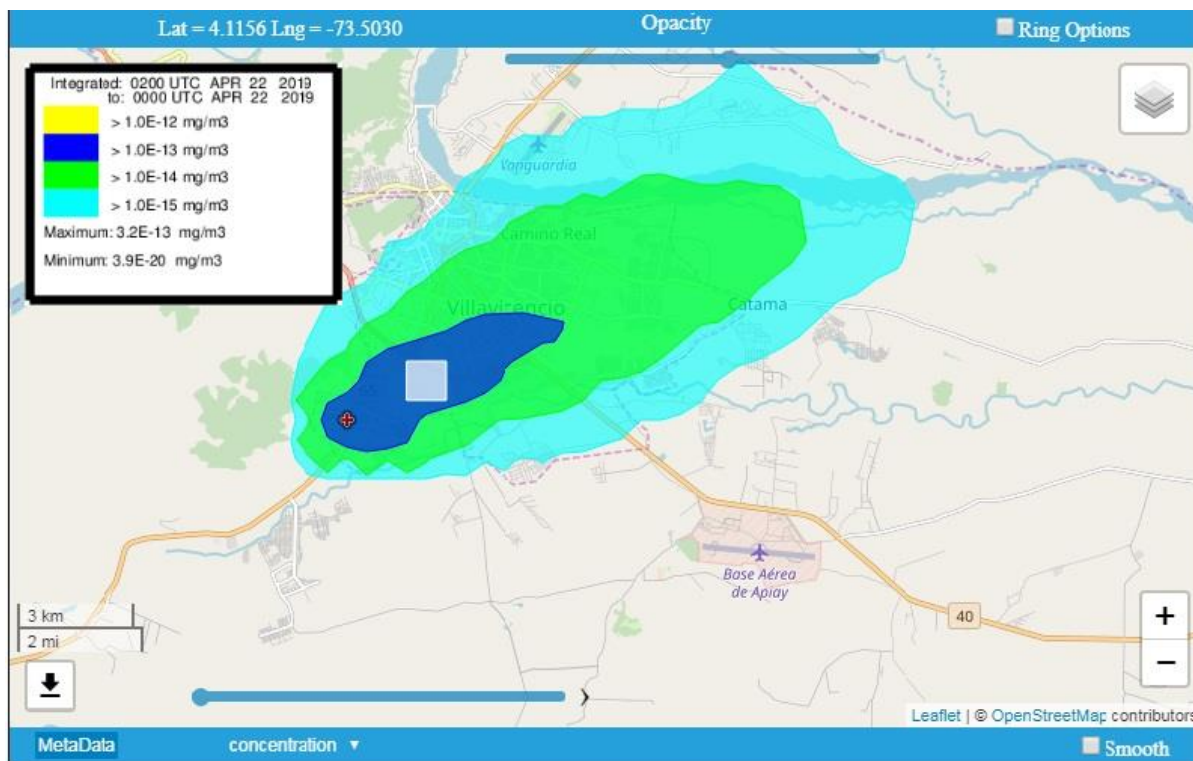


Figura 10: Concentración del PM₁₀ y O₃ en el espacio (Cristian Carrero, 2019).

En la Figura 10 se muestra el mapa generado por Hysplit, en el que observa la dispersión de los contaminantes a través del espacio, teniendo total concordancia con lo ilustrado por la rosa de vientos, pues en estas simulaciones se observa la dirección de las masas de aire las cuales van dirigidas al Noreste, con lo que se comprueba que el software analiza la dispersión del contaminante en dirección hacia donde lo transporta el viento; mostrando una disminución de la concentración a medida que aumenta la velocidad del viento y la distancia de la estación (Figura 9), pues allí fue registrada la concentración inicial o de entrada.

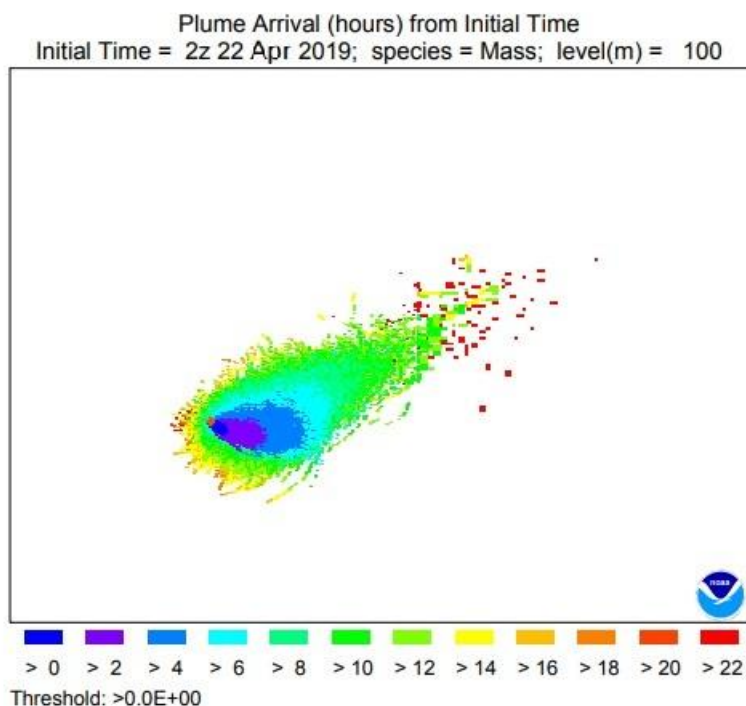


Figura 11: Dispersión del PM_{10} y O_3 en el espacio a través del tiempo (Cristian Carrero, 2019).

Por medio de la misma modelación (Figura 11), también se permite observar que estos compuestos alcanzan una mayor dispersión mientras el tiempo transcurrido es mayor, comportamiento que concuerda y sustenta la disminución de las concentraciones a medida que la trayectoria aumenta, además, se logra demostrar que los contaminantes pueden cubrir la ciudad completamente por la dirección de los vientos y la elevación que logran alcanzar (Figura 12), las trayectorias se determinaron usando dos bases meteorológicas: Reanalysis y GDAS.

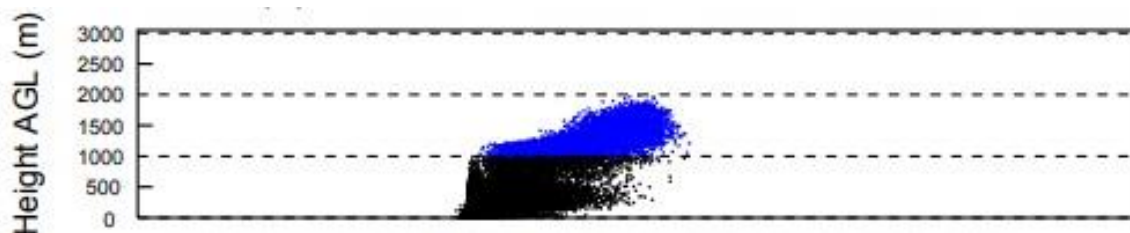


Figura 12: Elevación de los contaminantes (Cristian Carrero, 2019).

8.3. Fase III: Análisis de la correlación entre el IPA obtenido y los registros de concentración de contaminantes de la estación de calidad del aire

8.3.1. Correlación por Pearson: Para la realización de la correlación, se insertaron los resultados de los IPAs calculados durante las 30 fechas monitoreadas, con los datos de las concentraciones de PM₁₀ y O₃ reportadas por la estación de calidad del aire Montealegre durante las mismas fechas, al software IBM SPSS Statistics 22, por medio del cual se calculó la correlación de la siguiente manera:

Las variables insertadas fueron IPA folioso, IPA fruticoso, IPA costroso, IPA escamuloso, PM₁₀ y O₃, estas se correlacionaron de manera bivariada por medio del coeficiente de Pearson, analizadas así: O₃ – IPA folioso, O₃ – IPA fruticoso, O₃ – IPA costroso, O₃ – IPA escamuloso, PM₁₀ – IPA folioso, PM₁₀ – IPA fruticoso, PM₁₀ – IPA costroso y PM₁₀ – IPA escamuloso.

Para interpretar los resultados de la correlación por Pearson se tuvo en cuenta lo descrito en la

Tabla 5.

Tabla 5

Clasificación del coeficiente de correlación de Pearson

Coefficiente de Correlación Pearson	Concepto
Entre 0,2 y 0,4	Correlación baja
Entre 0,4 y 0,6	Correlación moderada
Entre 0,6 y 0,8	Correlación buena
Entre 0,8 y 1	Correlación muy buena

Nota. Clasificación del coeficiente de correlación de Pearson utilizado en la investigación. Por: (Lizama & Boccardo, 2014).

Basados en lo anterior, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson por medio de SPSS obteniendo los siguientes resultados (Tabla 6).

Tabla 6

Resultados de la correlación

		O ₃	PM ₁₀
IPA Folioso	Correlación de Pearson	-0,528	0,539
	Sig. (bilateral)	0,003	0,002
	N	30	30
IPA Fruticoso	Correlación de Pearson	-0,264	0,019
	Sig. (bilateral)	0,159	0,921
	N	30	30
IPA Costroso	Correlación de Pearson	-0,264	-0,627
	Sig. (bilateral)	0,158	0,000
	N	30	30
IPA Escamuloso	Correlación de Pearson	-0,084	0,066
	Sig. (bilateral)	0,659	0,732
	N	30	30

Nota Resultados de la correlación entre el IPA por biotipo y los contaminantes O₃ y PM₁₀. Por: Carrero & Rodríguez. 2019.

El valor de la correlación entre la concentración de O₃ y el valor del IPA folioso es de -0,528 lo cual refleja que entre estas dos variables existe una correlación moderada, con dirección negativa, es decir, una correlación inversa, por lo tanto al aumentar las concentraciones de O₃ disminuye el valor del IPA en líquenes de biotipo folioso.

Los resultados arrojados de la correlación entre el O₃ y el comportamiento del IPA en líquenes de biotipo fruticoso, se obtuvo un valor de correlación de -0,264, lo que indica que estas dos variables tendrían una correlación baja con dirección inversa, es decir, cuando las concentraciones de O₃ en el aire aumentan, el IPA de líquenes fruticosos disminuye.

Los líquenes de biotipo costroso, obtuvieron como resultado de la correlación con el O_3 un valor de $-0,264$, lo cual indicaría una correlación baja con sentido inverso, pero su nivel de significación es de $15,8\%$ por tal razón, no se puede señalar que existe una asociación entre estas dos variables, pues la probabilidad de que los valores obtenidos sean equívocos es de más del 15% .

Para el caso de los líquenes escamulosos en correlación con el O_3 , se genera un valor de $-0,084$, lo que indicaría que existe una correlación casi nula entre estas dos variables, sin embargo, no se puede establecer una asociación, pues el nivel de significación es de más del 65% , un porcentaje muy alto en cuando a la probabilidad de error, por lo tanto, el uso del biotipo escamuloso con indicador de la calidad del aire debe ser evaluado con mayor precisión, aunque los resultados generados dan una dirección a su poca sensibilidad ante las alteraciones atmosféricas y su bajo potencial como bioindicador.

Con respecto al PM_{10} , se muestra que existe asociación con los líquenes de biotipo folioso y costroso según la significación de $0,002$ y $0,000$ respectivamente. La correlación fue de $0,539$ para líquenes foliosos, lo cual indica que existe una correlación moderada entre estas dos variables, con dirección positiva, es decir que a medida que aumentan las concentraciones de PM_{10} , el valor del IPA aumenta, debido a que la cobertura de estos líquenes sería mayor.

En cuanto a la asociación con los líquenes costrosos, se obtuvo un resultado de $-0,627$ reflejando una correlación buena, con un porcentaje de error del 0% , por lo tanto este biotipo de líquen constituye un buen bioindicador ante las concentraciones de PM_{10} en el aire, para Villavicencio.

Para el caso de los biotipos fruticoso y escamuloso presentaron un nivel de significación de $0,921$ y $0,732$ respectivamente, por lo tanto, para estos biotipos no se puede establecer una asociación con el PM_{10} , dado que la probabilidad de error es muy alta, así que estos biotipos no son eficientes como bioindicadores para la concentración de PM_{10} en el aire de Villavicencio.

9. Discusión

9.1. Fase I: Identificación de líquenes en el área de estudio y cálculo del IPA

9.1.1. Selección de los árboles: Para la selección de los árboles fue importante tener en cuenta que las condiciones en las que estaban creciendo los líquenes fueran lo más parecidas entre sí, de manera que el comportamiento presentado por cada uno de los organismos estuviera sujeto a las variaciones en el aire, por lo tanto se hizo necesario medir el valor del pH de los sustratos con el propósito de verificar que estos fuera similares, ya que en sustratos con pH similares, se desarrollan especies de líquenes similares, además este factor tiene efecto sobre la presencia – ausencia de los líquenes y la distribución de los mismos (R. Lijteroff, L. Lima, & B. Prieri, 2009); asimismo las alteraciones en el pH del sustrato resultan ser dañinas, debido a que pueden afectar las moléculas y en efecto a los organismos (Canales, Hernández, Meraz, & Peñalosa, 1999).

También es importante recordar que los materiales se ionizan de manera diferente, lo cual influyen de uno u otro modo sobre los talos liquénicos (Barreno Rodríguez & Pérez Ortega, 2003); aunque no se conoce con detalle el mecanismo de influencia entre estos dos aspectos, sí se ha demostrado que estos organismos están relacionados con la acidez o alcalinidad de sus sustratos (Barreno Rodríguez & Pérez Ortega, 2003).

En la Tabla 2 es posible corroborar que los valores de Ph entre los sustratos seleccionados son pertinentes para elaborar la investigación, dado que la desviación estandar es de 0,34 indicando que la dispersión es mínima (Sabadías, 1995).

9.1.2. Cuento de frecuencia de cada biotipo de liquen y cobertura liquénica: En cuanto al conteo de la frecuencia de los líquenes se observó que estos a simple vista no evidenciaron cambios en su tamaño, lo anterior se debe a que el crecimiento de los líquenes es muy lento (R. Lijteroff, L. Lima, & B. Prieri, 2009), además de que el conteo consistió en el número de subcuadros de 10cm x 10cm en los que se presenciaba el biotipo de liquen, por lo

tanto, aunque estos presentaran cambios en su cobertura, variaban por unos pocos cm^2 , lo cual no generaba diferencias en el conteo de la frecuencia.

Con respecto a la cobertura líquénica, se observó que el biotipo de líquen con mayor cobertura líquénica fue el folioso, con un porcentaje del 85,28% como se muestra en la Figura 5, lo cual es un bioindicador de buena calidad del aire, pues es el mayor representado y según lo mencionado por (Ederra, 1996) y (Luking, 1997), este biotipo de líquen es muy sensible a las alteraciones atmosféricas de su hábitat, debido a que está sujeto de manera muy parcial a la corteza del árbol y absorbe la mayoría de sus nutrientes del aire (Barreno Rodríguez & Pérez Ortega, 2003), por lo consiguiente su alta colonización demuestra que las condiciones atmosféricas en la zona son buenas.

Para el caso del biotipo costroso, se obtuvo un porcentaje de cobertura líquénica del 14,39%, pues este biotipo de líquen resulta ser menos sensible a los cambios atmosféricos, ya que al no poseer corteza inferior, su dependencia a los nutrientes del árbol es mayor que los de talo folioso (Ederra, 1996; Hawksworth & Rose, 1970 y Barreno Rodríguez & Pérez Ortega, 2003). En cuanto a los biotipos de líquenes escamuloso y fruticoso, se identifica que este último aunque tiene una baja representatividad es considerado como bioindicador de ecosistemas urbanos con buena calidad del aire, también se caracterizan por ser los primeros afectados dentro de un ecosistema urbano tras la contaminación atmosférica (Hawksworth & Rose, 1970), sin embargo esto se puede deber a que existe algún factor en el medio que le impide colonizar un área mayor, debido a que son organismos que dependen de la humedad relativa del aire para su hidratación, por ello suelen ser más abundantes en territorios donde las nieblas son frecuentes (Barreno & Rico, 1984).

9.1.3. Cálculo del IPA: Los líquenes foliosos mostraron un comportamiento del IPA muy variado durante las 30 fechas monitoreadas, lo cual se debe a que los líquenes foliosos en su proceso de absorción de nutrientes también absorben los contaminantes presentes en el aire, los cuales se acumulan en sus tejidos, además el O_3 es un compuesto altamente oxidante y funciona como un catalizador muy potente de las membranas lipídicas de los líquenes, ocasionando daños en la membrana celular, además de afectaciones al aparato fotoquímico de los mismos

impidiendo que estos realicen con plenitud su proceso de fotosíntesis (Mares Rueda & García Sancho, 2017). Además, estos son el biotipo más sensible en cuanto a los cambios atmosféricos, ya que su unión al sustrato no es muy pronunciada, por lo tanto dependen de los nutrientes presentes en el aire, de manera que reaccionan con mayor facilidad a las alteraciones producidas en mismo (Ederra, 1996; Luking, 1997; Ciro1 & Botero, 2010 y Mares Rueda & García Sancho, 2017).

En lo que respecta a los líquenes costrosos, su variación durante el monitoreo fue menos pronunciada que el biotipo folioso, dado que son menos vulnerables a las alteraciones de la calidad del aire, dado que tienen una unión más estrecha con el sustrato (Ederra, 1996; Hawksworth & Rose, 1970; Valencia, 2002; Barreno Rodríguez & Pérez Ortega, 2003 y Berger & Quezada, 2016), por lo tanto, dependen en gran parte de la capacidad de los sustratos para retener el agua y condensarla (Barreno Rodríguez & Pérez Ortega, 2003).

Para el caso de los líquenes fruticosos, este biotipo es usualmente encontrado en ecosistemas urbanos con buena calidad del aire, dado que este tipo de líquen tiende a desaparecer muy rápido como consecuencia de la contaminación atmosférica, porque su unión con el sustrato no es muy pronunciada (Figuroa & Montoya, 2015).

9.2. Fase II: Estimación de zonas con mayor carga de contaminantes

9.2.1. Solicitud de información: Según la información suministrada por CORMACARENA acerca de lo medido por la estación Montealegre, se mostró que los niveles de O₃ y PM₁₀ se encontraron dentro de los niveles permisibles por la ley, a excepción del 15 de Abril del 2019, cuando el PM₁₀ registró una concentración de 121,12µgr/m³, esta anomalía fue asociada a un alto flujo vehicular debido a que inició el plan éxodo donde se esperaba entraran más de 230.000 vehículos (Salgado, 2019). Los datos reportados, fueron sometidos a un análisis estadístico (Tabla 4), donde se mostró que la dispersión entre los niveles de PM₁₀ durante este tiempo fue amplia, por lo cual el valor de la media o promedio resultó siendo poco significativa,

ya que el comportamiento de las concentraciones son independientes, pues estaban sujetas a los eventos que se presentaron a diario.

Para el caso del O_3 se muestra que su concentración promedio es de $9,81\mu\text{gr}/\text{m}^3$, valor que corresponde a menos del 10% de la concentración máxima permitida por la ley, y este dato resulta ser más preciso en cuanto al comportamiento general de este contaminante, pues el rango entre las concentraciones es de $26,99\mu\text{gr}/\text{m}^3$ con una desviación estándar de $5,86\mu\text{gr}/\text{m}^3$ y una varianza de $34,31\mu\text{gr}/\text{m}^3$, cifras que resultan ser menos dispersas que lo observado con el PM_{10} (Min: $8,04\mu\text{gr}/\text{m}^3$. Max: $121,12\mu\text{gr}/\text{m}^3$).

9.2.2. Construcción de la rosa de vientos: Los contaminantes monitoreados por la estación, han sido transportados por el aire desde su fuente emisora, hasta haber llegado al área de influencia de la estación de calidad del aire Montealegre (Duque T, 2016), la cual reporta la concentración de los mismos en ese punto. Una manera de observar y analizar las trayectoria de los contaminantes a través del aire, es por medio de la elaboración de una rosa de vientos, ya que esta permite mostrar la estadística climatológica mediante un diagrama polar el cual consiste en una serie de líneas que parten del centro de un círculo y apuntan en la dirección que el viento sopla; representa la frecuencia del viento y permite observar las velocidades de los vientos (Parker, 1983) como es posible observar en la Figura 9.

9.2.3. Dispersión de contaminantes: En la Figura 10, se permite observar que la concentración de contaminantes medidos por la estación es la misma que en el área de estudio seleccionada, de manera que el análisis y el comportamiento de los líquenes están bien relacionados con las cifras reportadas por la estación Montealegre, siendo esta misma zona la mayor afectada según la simulación, además, allí mismo los contaminantes se encontraban a menor altura, de manera que estaban más cerca de la superficie terrestre, donde la exposición a las sustancias es mayor (Figura 12).

9.3. Fase III: Análisis de la correlación entre el IPA obtenido y los registros de concentración de contaminantes de la estación de calidad del aire

9.3.1. Correlación por Pearson: En cuanto a los resultados arrojados por la correlación entre el O₃ y el comportamiento del IPA en líquenes de biotipo fruticoso, se obtuvo un valor de correlación de -0,264, lo que indica que estas dos variables tendrían una correlación baja con dirección inversa, es decir, cuando las concentraciones de O₃ en el aire aumentan, el IPA de líquenes fruticosos disminuye. Sin embargo, al observar los resultados de la correlación, se muestra que el nivel de significación es del 15,9%, el cual supera el error alfa, por lo tanto no es posible determinar una asociación entre los líquenes fruticosos y el O₃ por más que así lo indique el estadístico (Lizama & Boccardo, 2014).

De manera similar ocurre con la no asociación entre los líquenes costrosos y el O₃, debido a que los líquenes costrosos no son considerados muy sensibles a la variabilidad de concentraciones de contaminantes en el aire, pues estos dependen más del sustrato sobre el que crecen para adquirir los nutrientes necesarios, ya que su relación con el mismo es más estrecha, como ya se mencionó anteriormente por (Ederra, 1996; Hawksworth & Rose, 1970; Barreno Rodríguez & Pérez Ortega, 2003 y Cohn Berger & Quezada, 2016). Además, su representatividad se puede deber a que sus adaptaciones fisiológicas son más favorecidas en lugares donde hay altas concentraciones de humedad, condición que se cumple para la ciudad de Villavicencio, según (IDEAM, 2013)

En lo atinente a la asociación entre el IPA folioso y el PM₁₀, sería una reacción contraria al comportamiento que debería mostrar el IPA, en función de ser un buen bioindicador, pues según estudios, se permite inferir que el potencial de los líquenes como bioindicadores radica en que el IPA disminuye a medida que aumenta la contaminación en el aire, lo que supone una reducción en la cobertura de estos organismos (Cohn Berger & Quezada, 2016).

Lo anterior se confirma con diferentes estudios en los que se demuestra la susceptibilidad de estos organismos frente a la presencia de contaminantes como el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno (R. Lijteroff, L. Lima, & B. Prieri, 2009), amoníaco, fluoruros, el polvo alcalino,

metales y metales radioactivos e hidrocarburos clorados (Hawksworth, Iturriaga, & Crespo, 2005b), sin embargo, no se ha enunciado algún tipo de relación directamente con el PM_{10} .

8. Conclusiones

- Durante la etapa de los monitoreos de líquenes, se identificaron cuatro biotipos de líquenes según su forma de crecimiento, los cuales fueron folioso, fruticoso, costroso y escamuloso, estos fueron monitoreados durante 30 fechas, en las que se pudo apreciar que los líquenes crecen muy lento, de manera que el cambio en su cobertura es difícil de apreciar a simple vista.

A partir de los datos recolectados durante los monitoreos, se logró calcular el IPA para cada biotipo de liquen, obteniendo el valor más alto en los foliosos, lo cual define un Índice de Pureza atmosférica bueno para el área a monitorear, pues este biotipo de liquen es el considerado uno de los más sensible ante las condiciones atmosféricas, junto con el fruticoso, y su colonización en la zona es un indicador de la buena calidad del aire.

Condición que fue comprobada por lo medido por la estación de calidad del aire Montealegre, donde sus registros mostraron que la concentración de los contaminantes analizados PM_{10} y O_3 durante las fechas monitoreadas se encontraban dentro de los niveles permisibles según la resolución 2254, donde se establece que la concentración máxima permisible es de $100\mu\text{gr}/\text{m}^3$ para ambos contaminantes.

- Por medio del modelo Lagrangiano de Hysplit se logró simular la trayectoria de estos contaminantes a medida que son transportados en el aire, de manera que se permite observar que a lo largo del día estos van siendo más dispersos en dirección hacia donde fluye el viento, debido a esto, la concentración de estos contaminantes es menor mientras la distancia recorrida se hace más larga al igual que el tiempo transcurrido.

Este comportamiento de los vientos, ilustrado gráficamente mediante la rosa de vientos, refleja que los contaminantes medidos por la estación son transportados en dirección plena al área de estudio, demostrando que los líquenes monitoreados estuvieron expuestos a las

concentraciones que reportó la estación, pues según el modelamiento, la concentración de los contaminantes es la misma en la estación que en el área de estudio seleccionada.

- Mediante el análisis de correlación se logró determinar que los líquenes de biotipo folioso presentan una correlación moderada en cuanto a los niveles de Ozono y PM_{10} en la atmosfera, de manera que estos funcionan como bioindicadores para el primer contaminante, sin embargo el comportamiento mostrado en relación con el PM_{10} no señala que su eficiencia como bioindicador ante este contaminante sea buena.

En cuanto a los líquenes costrosos, se muestra que estos tienen un nivel de asociación bueno en cuanto al comportamiento del PM_{10} , a pesar de que se ha categorizado este biotipo como menos sensible en comparación con el folioso, en los resultados de la presente investigación se determina que su eficiencia como bioindicador ante la variación de PM_{10} en el aire de Villavicencio es bueno.

Para los líquenes fruticosos y escamulosos, no se estableció correlación alguna con los contaminante analizados, pues su nivel de significación superó en todos los casos el 10% de probabilidad de error, por lo tanto aun así se mostrara un nivel de correlación, este estaba sujeto a ser equivoco.

9. Recomendaciones

Como recomendación principal se propone realizar una evaluación más detallada del comportamiento de estos líquenes entrando al nivel de especies, de manera que se puedan identificar las especies más sensibles ante las alteraciones en aire o aquellas que sean tolerantes frente a las concentraciones de contaminantes en el aire.

En este sentido, también es importante evaluar el comportamiento de los mismos frente a otros contaminantes, pues para el presente caso fue con los contaminantes PM_{10} y O_3 , siendo estos los monitoreados por la estación de calidad del aire Montealegre, la cual fue tomada como punto de comparación debido a su ubicación dentro del área de estudio.

Dado lo anterior, también es interesante obtener una perspectiva desde una mayor cobertura en la ciudad, lo cual puede ser logrado mediante un estudio que abarque las tres zonas de la ciudad de Villavicencio que cuentan con las respectivas estaciones de calidad del aire ubicadas en los barrios Catumare, la Esmeralda y Parque de la vida Cofrem con el fin de determinar que estas zonas estén cumpliendo con los mismos parámetros permisibles y la presencia de los líquenes sean de buena indicación.

Entre otra de las perspectivas, se recomienda completar la información en cuanto al comportamiento de estos organismos y su eficiencia como bioindicadores a nivel laboratorio, donde los líquenes sean expuestos a diferentes contaminantes por tiempos determinados, para evaluar sus reacciones, cambios morfológicos y así efectuar un análisis de su comportamiento y su resistencia a la presencia de contaminantes directamente, obteniendo un análisis más exacto.

De igual manera se recomienda empezar a emplear este tipo de estudios para ser un complemento de las estaciones de calidad del aire y tener mayor credibilidad a los datos arrojados por las mismas.

10. Referencias bibliográficas

- Arciniegas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: Partículas suspendidas totales y fracción respirable pm10. *Luna Azul*, (34). <https://doi.org/10.17151/luaz.2012.34.12>
- Barreno, E., & Rico, V. (1984). Sobre la biología de los líquenes. I. Anatomía, morfología, y estructuras vegetativas. *Anales de Biología*, 1, 161-195.
- Barreno Rodríguez, E., & Pérez Ortega, S. (2003). *Líquenes de la Reserva Natural Integral de Muniellos, Asturias*. KRK ediciones.
- Berger, G. C., & Quezada, M. (2016). Líquenes como bioindicadores de contaminación aérea en el corredor metropolitano de la ciudad de Guatemala. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia*, 26(1), 20-39.
- Cabrera, S. & Giacobone, G. (2010). *Monitoreo de Líquenes como Bioindicadores de Contaminación* (p. 25). Buenos Aire: Ministerio de Ambiente y Espacio Público.
- Canales, M., Hernández, T., Meraz, S., & Peñalosa, I. (1999). *Fisicoquímica*. México: Iztacala. (Capítulo 4).
- Canseco, A., Anze, G., & Franken, M. (2006). Comunidades de líquenes: Indicadores de la calidad del aire en la ciudad de La Paz, Bolivia. *Acta Nova*, 3.
- Cirol, M. M. J., & Botero, L. R. B. (2010). Comunidades liquénicas como bioindicadores de calidad del aire del Valle de Aburrá. *Gestión y Ambiente*, 13(1), 97-110.
- Cohn Berger, G., & Quezada, M. (2016). *Líquenes como bioindicadores de la contaminación aérea en el corredor metropolitano de la ciudad de Guatemala*. 26(1), 20.
- Conti, M. E., & Cecchetti, G. (2001). Biological monitoring: Lichens as bioindicators of air pollution assessment — a review. *Environmental Pollution*, 114(3), 471-492. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00224-4](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00224-4)
- Duque T, J. F. (2016). *Sobre los efectos de la contaminacion Atmosférica en la Salud* (p. 13). UNICEF.
- Espitia, A. J. R. (2011). *Composición de la flora de líquenes corticícolas en el Caribe colombiano*. 196.

- Figuroa, E. V., & Montoya, A. P. M. (2015). *Evaluación de la calidad del aire en 8 zonas de la ciudad de Bogotá utilizando los líquenes como bioindicadores*. 75.
- Gaitán, M., Cancino, J., & Behrentz, E. (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. *Revista de Ingeniería*, (26), 81-92.
- Gaitán, V. M., & Cardenas, R. P. A. (2017). *Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas*. 92.
- Gelambi, M. (2019, julio 16). Líquenes: Características, tipos y especies. Recuperado 6 de agosto de 2019, de Lifeder website: <https://www.lifeder.com/liquenes/>
- Hawksworth, D. L., Iturriaga, T., & Crespo, A. (2005a). Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. *Revista Iberoamericana de Micología*, 22(2), 71-82. [https://doi.org/10.1016/S1130-1406\(05\)70013-9](https://doi.org/10.1016/S1130-1406(05)70013-9)
- Hawksworth, D. L., Iturriaga, T., & Crespo, A. (2005b). *Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos*. 12.
- IDEAM. (2017). Lanzamiento del informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2017— noticias - IDEAM. Recuperado 4 de septiembre de 2019, de http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset_publisher/LdWW0ECY1uxz/content/lanzamiento-del-informe-del-estado-de-la-calidad-del-aire-en-colombia-2017
- IDEAM. (2014). Contaminación atmosférica. Recuperado de IDEAM website: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/contaminacion-atmosferica>
- IDEAM. (2011). Informe del estado del medio ambiente Informe del estado del medio ambiente y los recursos renovables 2011 y los recursos naturales renovables 2011 Tomo 3— Contaminación del aire y agua en Colombia e impactos sobre la salud—Red de Desarrollo Sostenible de Colombia. Recuperado 6 de agosto de 2019, de <https://www.rds.org.co/es/novedades/informe-del-estado-del-medio-ambiente-informe-del-estado-del-medio-ambiente-y-los-recursos-renovables-2011-y-los-recursos>
- Jaramillo Ciro, M. M., & Botero Botero, L. R. (2010). *Comunidades Liquénicas como Bioindicadores de la Calidad del Aire del Valle de Aburrá*. 13, 14.

- Lizama, P., & Boccardo, G. (2014). *Guía de Asociación entre variables (Pearson y Spearman en SPSS)*. Universidad de Chile.
- MADS. Resolución 2254. , (2018).
- Mares Rueda, I., & García Sancho, L. (2017). *Líquenes como Bioindicadores de la Calidad del Aire* (Trabajo de Grado). Universidad Complutense.
- MAVDT. (2008). *Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire*. 287.
- McMullin, R. T., Ure, D., Smith, M., Clapp, H., & Wiersma, Y. F. (2017). Ten years of monitoring air quality and ecological integrity using field-identifiable lichens at Kejimikujik National Park and National Historic Site in Nova Scotia, Canada. *Ecological Indicators*, 81, 214-221. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.069>
- Méndez, J. F., Pinto Herrera, L. C., & Belalcázar Cerón, L. C. (2018). Estudio de una intrusión de polvo sahariano en la atmósfera de Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(32), 17-34. <https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a1>
- Miranda Ramos, K. C., & Zambrano Muñoz, J. D. (2017). *Análisis de reducción de pérdida en la fabricación de cubiertas onduladas*. Recuperado de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/42134>
- Muerza, A. (2006). El ozono como contaminante | Consumer. Recuperado 6 de agosto de 2019, de <https://www.consumer.es/medio-ambiente/el-ozono-como-contaminante.html>
- Nimis, P. L., Scheidegger, C., & Wolseley, P. A. (2002). Monitoring with Lichens—Monitoring Lichens. En *NATO Science Series. Monitoring with Lichens—Monitoring Lichens* (pp. 1-4). https://doi.org/10.1007/978-94-010-0423-7_1
- Parker, A. (1983). *Contaminación del aire por la industria*. Reverte.
- Quispe, K., Ñique Alvarez, M., & Chquilin, E. (2013). Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire en la ciudad de Tingo María, Perú. *Investigación y Amazonia*, 3, 99-104.
- R. Lijteroff, L. Lima, & B. Prieri. (2009). Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 2, 111-120.
- Rasband. (1997). ImageJ. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA. - References—Scientific Research Publishing. Recuperado 6 de agosto de 2019, de [https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1690059](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1690059)

- Rubiano O., L. J. (2002). *Monitoreo de Áreas de Isocontaminación en la Región de Influencia de la Central Termoeléctrica Martín del Corral Utilizando Líquenes como Bioindicadores*. 13, 91-105.
- Sabadías, A. V. (1995). *Estadística descriptiva e inferencial*. Univ de Castilla La Mancha.
- Salgado, Y. (2019). Villavicencio: Así será el plan de salida y retorno en esta Semana Santa. Recuperado 6 de agosto de 2019, de Periodico del Meta website: <https://periodicodelmeta.com/villavicencio-asi-sera-el-plan-de-salida-y-retorno-en-esta-semana-santa/>
- Servicio de Sanidad Forestal y Equilibrios Biológicos SSF. (2000). Inventario de Líquenes Epífitos. En *Manual Red CE de Nivel II* (Vols. 1–Parte VII).
- Valencia, M. C. de. (2002). *Hongos liquenizados*. Univ. Nacional de Colombia.
- Varela, Z., & López-Sánchez, G. (2018). Changes in epiphytic lichen diversity are associated with air particulate matter levels: The case study of urban areas in Chile. *Ecological Indicators*, 91, 307-314. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.023>
- Will-Wolf, S., Jovan, S., & Amacher, M. C. (2017). Lichen elemental content bioindicators for air quality in upper Midwest, USA: A model for large-scale monitoring. *Ecological Indicators*, 78, 253-263. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.017>
- World Health Organization. (2018). Health Impacts. Recuperado de WHO website: https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/health_impacts/es/

11. Apéndices

11.1. Apéndice A: Coordenadas de la ubicación de cada uno de los árboles seleccionados para realizar monitoreo.

ID	N	W
0	04°06'38.3"	73°39'23.6"
1	04°06'33.8"	73°39'22.2"
2	04°06'33.6"	73°39'21.7"
3	04°06'33.2"	73°39'21.2"
4	04°06'32.7"	73°39'20.7"
5	04°06'32.3"	73°39'21.0"
6	04°06'37"	73°39'16.3"
7	04°06'37"	73°39'16.6"
8	04°06'37.5"	73°39'16.7"
9	04°06'36.7"	73°39'19"
10	04°06'36.7"	73°39'19.9"
11	04°06'35.6"	73°39'19.5"
12	04°06'35.9"	73°39'19.8"
13	04°06'35.3"	73°39'19.9"
14	04°06'34.9"	73°39'19.1"
15	04°06'34.4"	73°39'18.3"
16	04°06'47.5"	73°39'11.4"
17	04°06'47.6"	73°39'11.9"
18	04°06'48.7"	73°39'11.4"
19	04°06'48.8"	73°39'11.3"
20	04°06'47.9"	73°39'10.9"

11.2. **Apéndice B: Perímetro y diámetro de los árboles seleccionados.**

ID	Perímetro (cm)	Diámetro (cm)	Elevación (msnm)
1	99	35	552
2	92	30	551
3	93	32	550
4	84	28	549
5	90	30	549
6	67	25	549
7	92	32	550
8	64	21	550
9	97	36	551
10	100	37	552
11	76	27	551
12	92	31	551
13	81	26	551
14	60	20	550
15	61	20	549
16	76	22	553
17	60	20	554
18	110	38	554
19	74	22	554
20	84	28	553

11.3. **Apéndice C: Valor de pH de la corteza por cada árbol seleccionado.**

ID	pH
0	7,111
1	7,43
2	6,9
3	6,2
4	6,56
5	6,64
6	6,74
7	6,64
8	6,58
9	6,25
10	6,66
11	6,65
12	7,00
13	6,61
14	6,11
15	6,45
16	7,01
17	7,22
18	7,11
19	6,53
20	6,58

11.4. **Apéndice D: Resultados del cálculo de la cobertura relativa por biotipo.**

Cobertura relativa del biotipo				
	Folioso	Fruticoso	Costroso	Escamuloso
14-mar-19	5,646	1,324	3,456	1
18-mar-19	5,664	1,456	3,436	1
21-mar-19	5,665	1,640	3,422	1
25-mar-19	5,642	1,733	3,387	1
28-mar-19	5,616	1,832	3,379	1
01-abr-19	5,437	1,949	3,299	1
04-abr-19	5,379	1,969	3,243	1
08-abr-19	5,308	1,893	3,212	1
11-abr-19	5,338	1,832	3,311	1
15-abr-19	5,355	1,743	3,324	1
18-abr-19	5,396	1,566	3,363	1
22-abr-19	5,443	1,447	3,458	1
25-abr-19	5,313	1,441	3,551	1
29-abr-19	5,305	1,430	3,598	1
02-may-19	4,990	1,393	3,588	1
06-may-19	5,033	1,369	3,666	1
09-may-19	5,023	1,335	3,684	1
13-may-19	5,105	1,390	3,708	1
16-may-19	5,099	1,448	3,718	1
20-may-19	5,081	1,495	3,761	1
23-may-19	5,063	1,574	3,769	1
27-may-19	5,092	1,642	3,782	1
30-may-19	5,118	1,585	3,718	1
03-jun-19	5,164	1,648	3,713	1
06-jun-19	5,219	1,762	3,782	1

10-jun-19	5,277	1,816	3,798	1
13-jun-19	5,301	1,955	3,622	1
17-jun-19	5,331	1,344	3,815	1
20-jun-19	5,360	1,000	3,835	1
24-jun-19	5,413	1,000	3,865	1

11.5. **Apéndice E: Porcentaje de cobertura líquénica por biotipo en cada fecha**

	% de Cobertura			
	Folioso	Fruticoso	Costroso	Escamuloso
14 de Marzo	84,7325	0,0584	14,9818	0,2273
18 de Marzo	84,8147	0,0607	14,9068	0,2178
21 de Marzo	84,8424	0,0644	14,8767	0,2165
25 de Marzo	84,9158	0,0671	14,8027	0,2144
28 de Marzo	84,9467	0,0705	14,7480	0,2348
01 de Abril	84,8817	0,0830	14,8286	0,2068
04 de Abril	85,0183	0,0889	14,7014	0,1914
08 de Abril	85,1919	0,0936	14,5383	0,1762
11 de Abril	85,2518	0,0965	14,4747	0,1770
15 de Abril	85,2611	0,1023	14,4595	0,1771
18 de Abril	85,200	0,1198	14,5015	0,1787
22 de Abril	85,0038	0,1387	14,6766	0,1809
25 de Abril	84,8696	0,1397	14,8132	0,1775
29 de Abril	84,9135	0,1405	14,7625	0,1835
02 de Mayo	84,5761	0,1451	15,1079	0,1709
06 de Mayo	84,5823	0,1440	15,0539	0,2198
09 de Mayo	84,7672	0,1501	14,9046	0,1781
13 de Mayo	84,9149	0,1585	14,6969	0,2297
16 de Mayo	85,2397	0,1544	14,3228	0,2830
20 de Mayo	85,3511	0,1520	14,2386	0,2584
23 de Mayo	85,5282	0,1456	14,0727	0,2535
27 de Mayo	85,6924	0,1398	13,9286	0,2392
30 de Mayo	85,8274	0,1254	13,7847	0,2625
03 de Junio	85,7879	0,1091	13,8297	0,2733
06 de Junio	85,8770	0,0962	13,7397	0,2871









10 de Junio	85,9211	0,0918	13,6833	0,3038
13 de Junio	86,5053	0,0760	13,1258	0,2929
17 de Junio	85,9994	0,0483	13,6704	0,2819
20 de Junio	86,0052	0,0383	13,6776	0,2789
24 de Junio	86,0271	0,0386	13,6591	0,2751
PROMEDIO	85,2815	0,1046	14,3856	0,2283











11.6. **Apéndice F: Valores del IPA por biotipo calculados por fecha.**











CALCULO IPA				
IPA	Folioso	Fruticoso	Costroso	Escamuloso
14-mar-19	16,1	0,4	5,4	0,14
18-mar-19	16,2	0,4	5,4	0,14
21-mar-19	16,2	0,5	5,4	0,14
25-mar-19	16,1	0,5	5,3	0,14
28-mar-19	16,0	0,5	5,3	0,14
01-abr-19	15,5	0,6	5,2	0,14
04-abr-19	15,4	0,6	5,1	0,14
08-abr-19	15,2	0,5	5,0	0,14
11-abr-19	15,3	0,5	5,2	0,14
15-abr-19	15,3	0,5	5,2	0,14
18-abr-19	15,4	0,4	5,3	0,14
22-abr-19	15,6	0,4	5,4	0,14
25-abr-19	15,2	0,4	5,6	0,14
29-abr-19	15,2	0,4	5,7	0,14
02-may-19	14,3	0,4	6,2	0,14
06-may-19	14,4	0,4	6,3	0,14
09-may-19	14,4	0,4	6,3	0,14
13-may-19	14,6	0,6	6,4	0,14
16-may-19	14,6	0,6	6,4	0,14
20-may-19	14,5	0,6	6,4	0,14
23-may-19	14,5	0,7	6,5	0,14
27-may-19	14,5	0,7	6,5	0,14
30-may-19	14,6	0,5	5,8	0,14
03-jun-19	14,8	0,5	5,8	0,14
06-jun-19	14,9	0,5	5,9	0,14

10-jun-19	15,1	0,5	6,0	0,14
13-jun-19	15,1	0,6	5,7	0,14
17-jun-19	15,2	0,4	6,0	0,14
20-jun-19	15,3	0,1	6,0	0,14
24-jun-19	15,5	0,1	6,1	0,14
Promedio	15,159	0,474	5,760	0,143



11.7. **Apéndice G: Comparación entre el estado inicial y final de los líquenes monitoreados.**

ÁRBOL	14 DE MARZO	24 DE JUNIO
0		
1		
2		
3		

4		
5		
6		
7		
8		

9		
10		
11		
12		
13		

14		
15		
16		
17		
18		

19		
20	